

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ



АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Под редакцией В. М. ПЕТРОВА
и А. Э. КРАВЧИКА



МОСКВА • ЭНЕРГИЯ • 1980

ББК 31.261.63
А90
УДК 621.313.333

Авторы: Е. П. Бойко, Ю. В. Гаинцев, Ю. М. Ковалев, А. Э. Кравчик, Э. Д. Кравчик, М. П. Кухарский, Ф. К. Макаров, В. Б. Мощицкий, В. М. Петров, Э. К. Стрельбицкий, Н. И. Суворов, Я. Б. Тубис, М. М. Шлаф

Асинхронные двигатели общего назначения/Бойко Е. П., Гаинцев Ю. В., Ковалев Ю. М. и др.; Под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. — М.: Энергия, 1980. — 488 с., ил.

В пер. 1 р. 60 к.

В книге изложены основные вопросы проектирования асинхронных двигателей общего назначения на напряжение до 1000 В, приведены методы расчета и оптимизации, проанализированы режимы работы, дана оценка эксплуатационной надежности асинхронных двигателей средней мощности, рассмотрены вопросы конструкции и технологии производства двигателей массовых серий. Особое внимание в книге уделено серии 4А.

Книга предназначена для инженеров, занимающихся проектированием, эксплуатацией и ремонтом асинхронных двигателей.

А 30307-384
051(01)-80 124-80. 2302030000

ББК 31.261.63
6П2.1. 081

© Издательство «Энергия», 1980 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В техническом преобразовании отраслей народного хозяйства ведущая роль принадлежит электрическим средствам автоматизации и механизации производственных процессов. Важнейшим средством электрификации, механизации и автоматизации, основой увеличения производительности машинного оборудования и масштабов производства является современный электропривод, на долю которого приходится до 63% общего потребления электроэнергии в стране.

Асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых во всех отраслях народного хозяйства. Такое положение эти машины завоевали благодаря чрезвычайно удачному сочетанию комплекса эксплуатационных и конструктивных характеристик, способности автоматически изменять момент вращения в соответствии с изменением момента сопротивления на валу (в пределах перегрузочной способности) и высокому к. п. д., с одной стороны, и относительной простоте и низкой стоимости в сочетании с высокой эксплуатационной надежностью при минимальном обслуживании — с другой.

Асинхронные двигатели общего назначения средней мощности (0,1—400 кВт) на напряжение до 1000 В — наиболее широко применяемые электрические машины. В народнохозяйственном парке электродвигателей они составляют по количеству 90%, по мощности — примерно 55%. Потребность, а следовательно, и производство асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В растет неуклонно из года в год. В десятой пятилетке выпуск асинхронных двигателей по сравнению с 1975 г. увеличится более чем в 1,3 раза.

Уже в настоящее время асинхронные двигатели потребляют более 40% вырабатываемой в стране электро-

энергии; на их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов: обмоточной меди, изоляции, электротехнической стали и других, а затраты на обслуживание и ремонт асинхронных двигателей в эксплуатации составляют более 5% затрат на ремонт и обслуживание всего установленного оборудования, поэтому создание серий высокоэкономичных и надежных асинхронных двигателей является важнейшей народно-хозяйственной задачей.

В предлагаемой вниманию читателей книге изложены основные вопросы проектирования асинхронных двигателей общего назначения на напряжение до 1000 В.

При написании книги авторы использовали многолетний опыт по проектированию и исследованию асинхронных двигателей, накопленный ими во ВНИПТИЭМ, опыт отечественных предприятий в этой области, а также современную отечественную и зарубежную литературу по проектированию асинхронных двигателей.

В книге освещены вопросы разработки технических требований к серии асинхронных двигателей на основе современных и перспективных требований, эксплуатации, производства, отечественных и международных стандартов, вопросы выбора исходных данных и оптимального проектирования серии.

Значительное место в книге уделено методам расчетов, проводимых при проектировании и исследовании асинхронных двигателей. Приведены также описание и характеристики основных материалов, применяемых в производстве современных асинхронных двигателей. На примере двигателей серии 4А книга дает представление о современной серии асинхронных двигателей, ее структуре, технических данных, конструкции и технологии производства.

В книге используется Международная система единиц измерения (СИ). В случае применения кратных и дольных единиц от единиц СИ, а также единиц других систем измерения в тексте сделаны соответствующие оговорки.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность доктору техн. наук В. И. Радинову за ценные замечания, изложенные в рецензии, а также Э. П. Клименко за тщательное редактирование рукописи.

Авторы признательны всем сотрудникам ВНИПТИЭМ, которые оказали им помощь в подготовке материалов отдельных разделов.

Настоящая книга является коллективным трудом ведущих специалистов ВНИПТИЭМ. Работа между авторами была распределена следующим образом:

предисловие и введение написаны В. М. Петровым; гл. 1 и 2 — А. Э. Кравчиком и В. М. Петровым, гл. 3 — Э. К. Стрельбицким, гл. 4 — Э. Д. Кравчиком и А. Э. Кравчиком, гл. 5 — Э. Д. Кравчиком, А. Э. Кравчиком и Ф. К. Макаровым, гл. 6 — Э. Д. Кравчиком, гл. 7 — Ю. В. Гаинцевым, гл. 8 — М. П. Кухарским, гл. 9 — Я. Б. Тубисом, гл. 10 — М. М. Шлафом, гл. 11 — Э. К. Стрельбицким и Н. И. Суворовым, гл. 12 — Ю. М. Ковалевым, гл. 13 — Э. Д. Кравчиком, гл. 14 — Е. П. Бойко, М. М. Шлафом и Ф. К. Макаровым, гл. 15 — В. М. Петровым, А. Э. Кравчиком, М. М. Шлафом и В. Б. Мощицким.

Общее редактирование книги проведено кандидатами технических наук В. М. Петровым и А. Э. Кравчиком.

Авторы понимают, что их книга не лишена недостатков и с благодарностью примут все замечания читателей. Их следует направлять в адрес издательства «Энергия»: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания единых серий электрических машин, имеющая исключительно важное значение в условиях социалистической системы планового ведения хозяйства, возникла в конце 20-х годов. Существовавшие в то время двигатели выпускались по иностранным чертежам и отличались нестандартизированными размерами и параметрами, устаревшей конструкцией, чрезмерной материалоемкостью.

Работа по созданию единой серии асинхронных двигателей была начата в 1928—1929 гг. на ведущих заводах «Электросила» и ХЭМЗ. В 30-х годах заводом «Электросила» были разработаны серии двигателей: АД мощностью от 1 до 10 кВт, АМ мощностью свыше 100 кВт и серия двухполюсных двигателей АД-3000 мощностью от 16 до 148 кВт. В то же время заводом ХЭМЗ была разработана серия асинхронных двигателей МА-200 с диапазоном мощностей от 10 до 100 кВт, явившаяся продолжением серии АД.

Серии АД, АМ, АД-3000, МА-200, разрабатывавшиеся как единые всесоюзные, этой предназначавшейся им роли не сыграли и были освоены только в производстве заводов-разработчиков.

В 1943 г. Баранчинским электромеханическим заводом была разработана серия асинхронных двигателей «Урал» мощностью от 1 до 13 кВт, предназначенная для замены устаревших двигателей серии АД.

Однако уже к концу 40-х годов эти серии не удовлетворяли требованиям производства и эксплуатации по следующим причинам: серии были недостаточно стандартизированы: не имели твердой шкалы мощностей и шкалы установочных размеров, что крайне затрудняло проектирование приводов и выбор электродвигателей; в силу множества серий двигателя каждой из них выпускались небольшими партиями, не имели унифицированных деталей и сборочных единиц, что

препятствовало рациональной организации производства и применению прогрессивных технологических процессов; серии не имели модификаций и исполнений, удовлетворяющих растущим запросам электропривода.

Дальнейшее развитие асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В протекало в направлениях стандартизации машин, унификации их деталей и сборочных единиц; повышения использования активных и конструктивных частей и снижения материалоемкости; повышения эксплуатационных и потребительских характеристик двигателей в соответствии с развивающимися потребностями электропривода.

Эти тенденции нашли воплощение в первой единой всесоюзной серии асинхронных двигателей — серии А, разработанной в 1946—1949 гг. Серия А состояла из семи габаритов и охватывала диапазон мощностей от 0,6 до 100 кВт. Наряду с защищенными двигателями (А) в серии впервые в отечественной практике были предусмотрены закрытые обдуваемые двигатели (АО), что существенно повышало надежность приводов.

В серии А впервые была принята твердая шкала мощностей, имеющая 15 ступеней. Помимо основного исполнения, в серии А был предусмотрен ряд модификаций, удовлетворяющих требованиям привода в части характеристик (двигатели с повышенным моментом, повышенным скольжением, многоскоростные, со встроенным тормозом, с фазным ротором) и специализированных исполнений по условиям окружающей среды (влагостойкие, химостойкие и тропические двигатели).

Серия А была освоена в производстве на нескольких заводах уже в 1951 г. и заменила восемь разрозненных мелких серий, что дало большой экономический эффект за счет экономии материалов и электроэнергии, а также за счет снижения трудоемкости изготовления в 3—6 раз и применения прогрессивной технологии.

Двигатели серии А отвечали уровню требований 50-х годов. К концу 50-х годов в связи с интенсивной электрификацией народного хозяйства и быстрым развитием электропривода возникла настоятельная потребность увеличения числа ступеней шкалы мощностей серии с целью уменьшения переустановленной мощности. Развитие электропривода также диктовало необходимость создания новых модификаций и специализированных исполнений двигателей. Следует отметить, что

в 1957 г. Международная электротехническая комиссия (МЭК) приняла решение и выпустила публикации рекомендуемых рядов мощностей и установочных размеров, которым не соответствовали двигатели серии А. Кроме того, передовые зарубежные фирмы начали выпускать двигатели с лучшими показателями, чем двигатели серии А.

Все эти обстоятельства привели к необходимости разработки новой единой серии асинхронных двигателей общего назначения. Этому способствовало создание в СССР новых марок обмоточных приводов с тонкослойной эмалевой изоляцией, а также создание новых видов электроизоляционных материалов. Новая серия — серия А2 — была разработана в 1957—1959 гг. Она состояла из девяти габаритов двигателей с высотами оси вращения от 90 до 280 мм, соответствующими рекомендациям МЭК. Шкала мощностей двигателей А2 соответствовала дополнительному ряду рекомендаций МЭК и состояла из 19 ступеней в диапазоне от 0,6 до 100 кВт. За счет применения новых прогрессивных электротехнических материалов, а также за счет рациональных размеров сердечников, определенных впервые в отечественной практике с помощью ЭВМ, в двигателях серии А2 удалось повысить уровень использования активных частей на 20—25%. В серии А2 был предусмотрен ряд дополнительных модификаций и специализированных исполнений. Все это дало возможность получить существенный экономический эффект в народном хозяйстве.

Первая единая всесоюзная серия асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт — серия А (с короткозамкнутым ротором) и АК (с фазным ротором) была разработана в 1952—1956 гг. Баранчинским электромеханическим заводом и заводом «Электросила». Серия имела твердую шкалу мощностей и отличалась высокой степенью унификации, что позволило применить типовую технологию при ее производстве. Серия выпускалась на нескольких заводах по единой технической документации. В 1959—1960 гг. эта серия была модернизирована. В это же время были разработаны впервые в отечественной практике закрытые обдуваемые двигатели (АО) этой серии.

К середине 60-х годов эта серия морально устарела: по массогабаритным показателям она существенно

(на 15—20%) уступала зарубежным сериям; шкала установочных размеров серии А и АК не соответствовала рекомендациям МЭК. В связи с этим в 1964—1968 гг. Центральным проектно-конструкторским и технологическим бюро крупных электрических машин (ЦПКТБ КЭМ, г. Ленинград), Московским электромеханическим заводом им. Владимира Ильича и Баранчинским электромеханическим заводом им. Калинина была разработана новая, вторая единая серия асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт — серия А2. Благодаря применению новых изоляционных материалов, улучшению охлаждения и совершенствованию конструкции уровень использования активных частей машины этой серии был повышен на 20—25%, что дало большой экономический эффект. Аналогичные разработки вели все страны — члены СЭВ по совместно разработанной увязке шкал мощностей и установочных размеров.

В начале 60-х годов ведущие электротехнические фирмы 14 стран Западной Европы создали Европейский комитет по координации электротехнических стандартов (CENEL). Этот комитет на базе национальных стандартов ФРГ DIN 42673 и DIN 42677 в 1964 г. дал рекомендации, устанавливающие увязку рядов мощностей и установочных размеров трехфазных низковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. На основе этих рекомендаций западноевропейские фирмы создали ряд серий асинхронных двигателей общего назначения, имеющих преимущества перед двигателями А2 по целому ряду показателей и прежде всего по массогабаритным и виброакустическим характеристикам.

Примерно к этому же времени относится создание аналогичных серий в США на основе стандартов NEMA.

Аналогичные работы велись и странами — членами СЭВ. Эти работы закончились принятием в 1968 г. рекомендаций по проектированию новой серии асинхронных двигателей общего назначения, унифицированной в рамках СЭВ по шкалам мощностей, установочных размеров и их взаимной увязке (РС3031).

На основе этих рекомендаций в Советском Союзе и ряде стран — членов СЭВ (ГДР, ЧССР, НРБ) в 1969—1972 гг. были разработаны новые серии асинхронных

двигателей общего назначения. В СССР эта серия получила название серии 4А.

Создание новой, унифицированной в рамках СЭВ серии асинхронных двигателей общего назначения, включающей в себя все двигатели мощностью до 400 кВт на напряжение до 1000 В, с одновременным техническим перевооружением предприятий на основе передовой технологии и автоматизации производственных процессов явилось важнейшей народнохозяйственной задачей.

Решение этой задачи требует проведения широкого комплекса работ по разработке конструкции электродвигателей, прогрессивной технологии их производства, специального оборудования, новых электротехнических материалов и комплектующих изделий, заказа и изготовления технологического оборудования, реконструкции и технического перевооружения действующих, а также строительства новых электромашиностроительных заводов. В связи с тем, что разработку и освоение серии 4А было необходимо провести в короткие сроки, впервые в практике отечественного электромашиностроения была создана комплексная программа проектирования и освоения в производстве новой единой серии асинхронных двигателей 4А, которая предусматривала параллельное выполнение работ всеми привлекаемыми к реализации программы 4А конструкторскими, технологическими, проектными организациями и электромашиностроительными заводами, а также широкую кооперацию с предприятиями, организациями других министерств и ведомств, обеспечивающих поставку материалов, комплектующих изделий и нового технологического оборудования. Кроме того, в рамках комплексной программы 4А предусматривалась координация работ и решение организационных и технических вопросов на межотраслевом и международном (в рамках СЭВ) уровнях.

В разработке серии 4А принимали участие: Ереванское отделение ВНИИЭМ (двигатели с высотами оси вращения 50—63 мм), специальное конструкторское бюро Харьковского электротехнического завода (71—100 мм), специальное конструкторское бюро Томского завода «Сибэлектромотор» (112—132 мм), Всесоюзный научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашино-

строения (160—250 мм) и Московский электромеханический завод им. Владимира Ильича (4А, 280—355 мм). Научное руководство разработкой серии 4А осуществлял ВНИИЭМ.

Работы по созданию новых технологических процессов, разработке и заказу специального оборудования осуществлялись ведущей организацией ВНИИТЭлектромаш (г. Харьков) и соисполнителями ВПИТЭлектро (г. Ленинград) и ВНИИТМЭ (г. Тбилиси). Всего в работах по серии 4А приняли участие 42 организации 14 министерств. Следует отметить, что до этого времени в электротехнической промышленности не имелось опыта в управлении реализацией комплексных многоцелевых программ, а поэтому в процессе управления комплексной программой осуществлялось создание эффективной организационной структуры управления комплексом работ по программе. Работа по управлению всем комплексом осуществлялась ВНИИТЭМ.

В серии 4А за счет применения новых электротехнических материалов и рациональной конструкции мощность двигателя при данных высотах оси вращения повышена на две-три ступени по сравнению с мощностью двигателей серии А2, что дало большую экономию дефицитных материалов. Существенно улучшились виброшумовые характеристики. При проектировании серии большое внимание было уделено повышению надежности машин. Впервые в мировой практике для асинхронных двигателей общего назначения были стандартизованы показатели надежности. Серия имеет широкий ряд модификаций и специализированных исполнений для максимального удовлетворения нужд электропривода. Благодаря высокому уровню унификации и стандартизации деталей и сборочных единиц это не создает существенных затруднений в производстве. Так, одна высота оси вращения имеет около 10 000 исполнений (по мощности, частоте вращения, напряжению, частоте сети, форме исполнения, степени защиты и т. д. и т. п.). Эти исполнения реализуются сочетанием небольшого количества деталей и сборочных единиц: четыре вида станин, три вида подшипниковых щитков, три вида листов сердечника статора и др. Детальное описание двигателей серии 4А приведено в гл. 16.

Уже в настоящее время в Советском Союзе ведутся работы по созданию новой перспективной серии асинхронных двигателей общего назначения. В основу структуры этой серии будут положены новые рекомендации МЭК по ряду мощностей и установочных размеров двигателей и ожидаемое решение по взаимной увязке этих рядов, решения МЭК по моментным и виброакустическим характеристикам и др. Новая серия предполагается единой в рамках СЭВ не только по выходным параметрам, но и по конструкции и технологии производства самих машин. Особое внимание при создании перспективной серии будет уделяться технологичности конструкции и созданию предпосылок для всемерной автоматизации производственных процессов.

Наряду с развитием серий асинхронных двигателей общего назначения совершенствовались и методы их проектирования.

Первые расчетные нормалы на асинхронные двигатели были созданы в довоенные годы на заводах «Электросила» и ХЭМЗ. Развитием этих работ явилась нормаль по расчетам асинхронных двигателей, созданная в 50-х годах и в последующем усовершенствованная. Однако при этом подход к проектированию серий мало отличался от подхода к проектированию отдельных машин, а выбор оптимального варианта зависел в значительной степени от интуиции расчетчиков и конструкторов. Принципиально новый подход к проектированию асинхронных машин был разработан в конце 50-х годов. Этот метод основан на оптимизации размеров активных частей машин по заранее выбранным критериям, которая проводится с помощью ЭВМ. Это потребовало более тщательного подхода к постановке задачи и формулированию технических требований.

Метод оптимального проектирования в настоящее время является основным при создании новых серий.

Глава первая

ХАРАКТЕРИСТИКА И ОБЪЕМ ВОПРОСОВ, РЕШАЕМЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЕДИНЫХ СЕРИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1-1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проектированию новой серии асинхронных двигателей предшествует разработка технико-экономических требований. С одной стороны, требования к новой серии вытекают из все возрастающих и расширяющихся задач электропривода, связанных с необходимостью обеспечения более полного, экономичного и надежного преобразования электрической энергии в механическую при огромном многообразии приводов, отличающихся мощностями, формами исполнения, частотами вращения и характеристиками моментов сопротивления, параметрами питания и свойствами окружающей среды и др. С другой стороны, они обусловлены необходимостью расширения производства асинхронных двигателей при обеспечении роста производительности труда путем применения прогрессивных технологических процессов и высокопроизводительного автоматизированного оборудования и всемерной экономии материалов. В значительной мере эти требования противоречивы. В разрешении этих противоречий на основе новейших достижений в области электротехнических и конструкционных материалов, методов проектирования, конструкции, технологии и организации производства и заключается диалектическое развитие технического прогресса.

Задача разработки требований к новой серии асинхронных двигателей существенно облегчается наличием национальных стандартов и международных документов, регламентирующих основную часть этих требований.

а) Структура серии

Для наиболее полного удовлетворения потребностей электропривода серия асинхронных двигателей общего назначения должна состоять из основного (базового) исполнения и широкого ряда модификаций и специализированных исполнений. При проектировании модификаций и специализированных исполнений следует стремиться к максимальной их унификации и наиболее полному использованию сборочных единиц и деталей базовой модели. С таких позиций и формулируются требования к серии. Серия должна включать в себя:

1) основное исполнение — двигатели, соответствующие общим требованиям электропривода, предназначенные для нормальных условий работы, с нормальной точностью исполнения. Двигатели основного исполнения являются базой для разработки модификаций и специализированных исполнений. В серии машин общего назначения основное исполнение — это трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP44 и IP23 (22) с различными формами исполнения по способу монтажа;

2) модификации — двигатели, имеющие то же значение главного параметра (высоту оси вращения), что и двигатели основного исполнения, но отличающиеся рабочими свойствами: пусковыми характеристиками, уровнем шума и т. д. К модификациям относятся:

двигатели с повышенным пусковым моментом для привода транспортеров, компрессоров и других механизмов с высоким статическим или динамическим моментом сопротивления при пуске и стабильной нагрузкой в номинальном режиме;

двигатели с повышенным скольжением для приводов механизмов с относительно большими маховыми массами, с пульсирующим характером нагрузки. Двигатели рассчитаны на повторно-кратковременные режимы работы S3, S4, S5 (ГОСТ 183-74);

многоскоростные двигатели на две, три и четыре частоты вращения для привода механизмов, требующих ступенчатого изменения скорости: металлорежущие станки, вентиляторы, дымососы, текстильные машины; двигатели с фазным ротором;

Перечисленные выше модификации должны быть унифицированы с основным исполнением по всем дета-

лям и сборочным единицам, за исключением обмоток статора или ротора;

двигатели со встроенным электромагнитным тормозом для приводов с фиксированным остановом (грузоподъемные механизмы, некоторые виды металлообрабатывающих станков и др.). Эти машины могут быть как в основном исполнении, так и в модификациях (с повышенным скольжением и многоскоростные) и должны унифицироваться с базовой моделью по всем элементам, за исключением вала и переднего подшипникового щита, на котором монтируется тормозное устройство;

малощумные двигатели для приводов, работающих в помещениях с особыми акустическими требованиями. По допустимому уровню шума эти двигатели относятся к третьему классу (ГОСТ 16372-77). Двигатели должны быть унифицированы с основным исполнением по всем деталям и сборочным единицам, за исключением подшипниковых и вентиляционных узлов, обмоток статора и ротора;

однофазные двигатели. Двигатели должны быть максимально унифицированы с двигателями основного исполнения и могут отличаться от последних обмоткой статора, выводным устройством, наличием пускового и отключающего устройства;

двигатели на частоту сети 60 Гц. Двигатели должны быть предусмотрены в основном исполнении и модификациях: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные, с фазным ротором, однофазные. Двигатели отличаются от базовых только обмоткой статора.

3) специализированные исполнения — двигатели, удовлетворяющие повышенным требованиям потребителей в части условий применения. Различают специализированные исполнения по точности установочных и присоединительных размеров и по условиям окружающей среды. К последним относятся двигатели тропического, влагоморозостойкого, химостойкого исполнений, двигатели для сельского хозяйства и т. д. Двигатели специализированных исполнений по условиям окружающей среды отличаются от двигателей основного исполнения изоляционными материалами и защитными покрытиями, соответствующими специфическим условиям применения. Двигатели специализированного исполнения могут

иметь модификации. Для получения более надежных конструкций, а также упрощения организации производства перечисленные модификации (за исключением двигателей с фазным ротором) и специализированные исполнения целесообразно проектировать только на базе основного исполнения со степенью защиты IP44.

На базе серии (ее основного исполнения или модификаций) могут проектироваться узкоспециализированные исполнения для конкретных приводов. Эти исполнения имеют ограниченный объем выпуска. Степень унификации их с базовыми моделями значительно меньше, чем в основной серии. Примером таких машин могут служить лифтовые двигатели, двигатели для привода судовых механизмов, двигатели для приводов с частотным регулированием и др.

б) Ряды номинальных мощностей и установочных размеров

Современная серия асинхронных двигателей представляет собой стандартизированный ряд машин. Стандартизация этого ряда проводится в первую очередь по значениям номинальных мощностей, установочным размерам и частотам вращения. В СССР ряды номинальных мощностей установлены ГОСТ 12139-74. Основное исполнение серии двигателей на напряжение до 1000 В включает в себя машины мощностью от 0,06 до 400 кВт. Ряду номинальных мощностей в серии должен соответствовать ряд высот оси вращения, выбираемых в соответствии с ГОСТ 13267-73. Другие установочные размеры жестко связаны с высотой оси вращения и установлены ГОСТ 18709-73. Увязка рядов мощностей и установочных размеров производится с учетом возможного уровня электрических и магнитных нагрузок, свойств электротехнических материалов и эффективности охлаждения. Более подробно вопросы выбора рядов мощностей, установочных размеров и их взаимной увязки рассматриваются в гл. 2.

в) Частоты вращения

Асинхронные двигатели основного исполнения серии выпускаются, как правило, на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. В зависимости от требований потребителей серия может включать в себя

двигатели на 600 и 500 об/мин (предусматриваются для высот оси вращения свыше 200 мм).

Модификация основного исполнения — многоскоростные двигатели — выполняются на две, три и четыре частоты вращения: 1500/3000, 1000/1500, 750/1500, 750/1000, 500/1000, 1000/1500/3000, 750/1500/3000, 750/1000/1500, 500/750/1000/1500 об/мин.

Частоты вращения электрических машин (в том числе и асинхронных двигателей) и допускаемые отклонения частот установлены ГОСТ 10683-73.

г) Напряжение и частота сети

Асинхронные двигатели на напряжение до 1000 В должны проектироваться на стандартные номинальные напряжения и частоты, принятые для советских и западноевропейских сетей. Такими напряжениями являются 220; 380 и 660 В при частоте 50 Гц. Двигатели на другие напряжения выпускаются обычно по особому заказу. ГОСТ 183-74 устанавливает отклонения напряжения и частоты от номинальных значений, при которых двигатели должны сохранять номинальную мощность.

д) Степени защиты

Оболочки электрических машин должны обеспечивать защиту от попадания внутрь твердых посторонних тел, проникновения воды и защиту обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри машины. Степени защиты установлены ГОСТ 17494-72. Для асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В в мировой практике приняты две основные степени защиты: IP44 и IP23. Для некоторых специализированных исполнений двигателей, работающих в пыльных и влажных помещениях, могут быть дополнительно предусмотрены степени защиты IP54 или IP56. Двигатели мощностью свыше 100 кВт, работающие в специальных помещениях, могут выполняться со степенью защиты IP22. Степень защиты в значительной мере определяет конструктивное исполнение машины.

е) Формы исполнения

Для наиболее полного удовлетворения нужд электропривода и выполнения электродвигателей в соответствии с компоновкой приводимых механизмов в серии асинхронных машин должен быть предусмотрен ряд форм исполнений по способу монтажа, установленных ГОСТ 2479-65. Асинхронные двигатели основного исполнения должны иметь четыре основные формы:

M100 — на лапах с двумя подшипниковыми щитами;
M200 — на лапах с двумя подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите;
M300 — без лап, с фланцем на подшипниковом щите;
M500 — встраиваемые и модификации этих исполнений, предусматривающие горизонтальное и вертикальное расположение оси вала.

Двигатели различных форм исполнений должны быть максимально унифицированы по основным деталям и сборочным единицам, что в известной степени определяет вид некоторых элементов машины, прежде всего подшипниковых узлов.

ж) Энергетические показатели

При проектировании современных серий асинхронных двигателей конкретные значения энергетических показателей: к. п. д. и коэффициента мощности — не задаются. Эти показатели, отражающие основные эксплуатационные затраты, связанные с преобразованием электрической энергии в механическую, в оптимизационных расчетах учитываются при определении размеров и параметров двигателей, исходя из минимума затрат на производство и эксплуатацию машин. Следует отметить неравнозначность к. п. д., отражающего затраты, связанные с активными потерями электроэнергии, и коэффициента мощности, отражающего затраты на компенсацию реактивной энергии [1].

При проектировании следует иметь в виду, что асинхронные двигатели общего назначения должны достаточно эффективно работать в широком диапазоне изменения нагрузки, т. е. кривые изменения к. п. д. и $\cos \phi$ должны быть достаточно пологи. Поэтому в оптимизационных расчетах двигателей учитываются энергетические показатели не номинального, а наиболее вероятно-

го режима работы. Коэффициент загрузки двигателей по мощности колеблется в пределах от 0,3 до 0,7 в зависимости от вида привода и номинальной мощности двигателя.

На энергетические показатели, получаемые при оптимизационных расчетах, оказывает влияние и степень использования двигателя во времени [14]. Усредненные

Таблица 1-1

Номинальная мощность двигателей, кВт	До 3	3—45	45—100
Коэффициент загрузки	0,4	0,42	0,45
Число часов работы в год	1000	1400	1650

значения коэффициента загрузки двигателей по мощности и число часов их работы в год приведены в табл. 1-1.

Энергетические показатели в известной мере характеризуют технический уровень асинхронных двигателей.

з) Пусковые характеристики

Пусковые характеристики асинхронных двигателей определяются кратностью начального пускового и минимального моментов и кратностью начального пускового тока.

В части требований к кратности пускового и минимального моментов асинхронные двигатели, предназначенные для прямого пуска, без переключения обмотки, подразделяются на две категории:

нормальные двигатели (двигатели типа N по классификации МЭК);

двигатели с повышенным (высоким) пусковым моментом (двигатели типа H по классификации МЭК).

В табл. 1-2 и 1-3 приведены значения кратности начального пускового $M_n/M_{ном}$ и минимального моментов $M_{min}/M_{ном}$ в зависимости от номинальной мощности P_n : I — соответствующие требованиям, предъявляемым к основному исполнению двигателей отечественных серий, II — соответствующие рекомендациям МЭК для перспективных разработок двигателей типа N.

Таблица 1-2

P_2 , кВт	$M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$ при n_c , об/мин							
	3000		1500		1000		750	
	I	II	I	II	I	II	I	II
<1	2,0	1,9—1,8	2,0	2,0—1,9	2,0	1,7	1,6	1,5
1—10	2,0	1,7—1,5	2,0	1,9—1,6	2,0	1,6—1,5	1,8	1,4—1,3
10—100	1,2	1,4—1,0	1,2	1,5—1,1	1,2	1,4—1,1	1,2	1,2—1,0
>100	1,0	0,9—0,65	1,0	1,0—0,65	1,0	1,0—0,65	1,0	0,9—0,65

Таблица 1-3

P_2 , кВт	$M_{\text{min}}/M_{\text{НОМ}}$ при n_c , об/мин							
	3000		1500		1000		750	
	I	II	I	II	I	II	I	II
<10	1,2	1,3—1,0	1,6	1,4—1,1	1,6	1,2—1,1	1,2—1,4	1,1—1,0
10—100	1,0	1,0—0,7	1,0	1,1—0,8	1,0	1,0—0,8	1,0	0,9—0,7
>100	0,9	0,7—0,5	0,9	0,8—0,5	0,9	0,8—0,5	0,9	0,7—0,5

Следует отметить, что отечественные нормы, указанные в табл. 1-2, 1-3, имеют допускаемые отклонения, установленные ГОСТ 183-74: —15% для кратности начального пускового момента и —20% для кратности минимального момента. Рекомендации МЭК минусового допуска не предусматривают.

Модификации основного исполнения — двигатели с повышенным пусковым моментом — в отечественных сериях выпускаются с диапазоном мощностей от 10 до 100 кВт. Кратность их начального пускового момента должна соответствовать нормам двигателей мощностью 1—10 кВт (табл. 1-2). Кратность минимального момента двигателей этой модификации должна быть не ниже 1,6. Кратности пускового и минимального моментов двигателей типа Н в соответствии с рекомендациями МЭК должны быть в 1,5 раза выше соответствующих величин двигателей типа N; при этом $M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}} \geq 2$; $M_{\text{min}}/M_{\text{НОМ}} \geq 1,4$.

В табл. 1-4 приведены значения кратности пускового тока $I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}$, соответствующие требованиям, предъявляемым к асинхронным двигателям основного исполнения.

Таблица 1-4

P_2 , кВт	$I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}$ при n_c , об/мин			
	3000	1500	1000	750
	I	II	I	II
<1	5,0—5,5	4,5—5,0	4,0	3,5
1—10	6,0—7,0	5,0—7,0	5,5—6,0	5,5—6,0
10—100	7,5	7,0	6,5—7,0	6,0
>100	7,0	7,0	7,0	6,5

Допуски на кратность пускового тока в соответствии с ГОСТ 183-74 составляют +20%.

В последних публикациях МЭК рекомендует регламентировать не кратность пускового тока $I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}$, а кратность пусковой мощности, представляющую собой отношение потребляемой полной мощности при заторможенном роторе, кВт·А, к номинальной мощности, кВт, т.е.

$$p_L = \frac{P_{\Pi}}{P_2} = \frac{mU_{\text{НОМ}} I_{\Pi}}{mU_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}}} \cdot 1 \quad (1-1)$$

Рекомендуемые МЭК значения p_L для двигателей типов N и H приведены в табл. 1-5.

Таблица 1-5

P_2 , кВт	<6,3	6,3—25	25—100	>100
p_L , кВт·А/кВт (не более)	13	12	11	10

Положительные допускаемые отклонения от значений, указанных в табл. 1-5, не предусматриваются.

Таблица 1-6

P_2 , кВт	$M_{\text{кр}}/M_{\text{НОМ}}$ при n_c , об/мин							
	3000		1500		1000		750	
	I	II	I	II	I	II	I	II
<10	2,2	2,0	2,2	2,0	2,2	1,9—1,7	2,2—1,7	1,6—1,8
10—100	2,2	2,0—1,8	2,2	1,9—1,8	2—1,9	1,8—1,7	2—1,9	1,7
>100	1,9	1,7—1,6	2—1,9	1,7—1,6	1,9	1,7—1,6	1,9	1,7—1,6

Перегрузочная способность асинхронных двигателей характеризуется кратностью максимального критического момента $M_{кр}/M_{ном}$. В табл. 1-6 приведены значения кратности максимального момента:

I — соответствующие требованиям, предъявляемым к двигателям основного исполнения отечественных серий; II — соответствующие рекомендациям МЭК для двигателей типа N.

ГОСТ 183-74 предусматривает допускаемые отклонения от значений $M_{кр}/M_{ном}$, указанных в табл. 1-6, равные —10%, а нормы МЭК допуска не предусматривают.

Кратность максимального момента двигателей типа N должна соответствовать согласно рекомендациям МЭК кратности максимального момента двигателя типа N, но быть не менее 1,9.

Нагрев двигателя при пуске, зависящий от пускового тока и времени разгона, может быть регламентирован допускаемой скоростью нарастания температуры обмотки при заторможенном роторе, °C/с. Для медных обмоток

$$v_t = \left(\frac{I_{п}}{I_{ном}} J_T \right)^2 \frac{1}{200}, \quad (1-2)$$

где J_T — плотность тока в обмотке, А/мм², при номинальном режиме.

Рекомендуемые отечественной практикой предельные значения v_t для двигателей общего назначения приведены в табл. 1-7.

Т а б л и ц а 1-7

2p	v_t , °C/с, при классе нагревостойкости изоляции	
	В	Ф
2	8	10
4—8	6	8

Вместо скорости нарастания температуры МЭК рекомендует регламентировать внешний момент инерции, который определяется выражением

$$J = k \frac{P_2^\lambda}{(n_c/1000)^v}. \quad (1-3)$$

Для асинхронных двигателей общего назначения:

$$\lambda = 0,9; \quad v = 2,5.$$

Двигатели должны допускать один пуск из горячего состояния (после длительной работы двигателя в номи-

нальном режиме) или два последовательных пуска из холодного состояния с остановкой двигателя между пусками. При этом для двигателей типа N статический момент сопротивления пропорционален квадрату частоты вращения и равен номинальному моменту при номинальной частоте вращения, а внешний момент инерции определяется по (1-3). Для двигателей типа N статический момент сопротивления постоянен и равен номинальному моменту, а внешний момент инерции равен половинному значению J из (1-3).

и) Виброшумовые характеристики

Массовое внедрение во все области деятельности людей электрических машин и особенно асинхронных двигателей остро поставило вопрос о снижении создаваемых ими шумов, поскольку последние не только ухудшают комфортность и снижают производительность труда, но и во многих случаях представляют серьезную угрозу здоровью человека. В СССР до 1965 г. серии двигателей общего назначения, за исключением отдельных модификаций, разрабатывались без нормирования требований по виброшумовым характеристикам.

На основе изучения зарубежных стандартов и некоторых отечественных норм был выпущен ГОСТ 16372-70, замененный впоследствии на ГОСТ 16372-77. ГОСТ 16372-77 устанавливает порядок нормирования шумовых характеристик вращающихся электрических машин номинальной мощностью от 0,25 до 1000 кВт. Стандарт соответствует рекомендации СЭВ РС 1194-73 и публикации МЭК 34-9-72.

Средний допустимый уровень звука L_{d1A} в режиме холостого хода машин класса 1 (машины, к которым не предъявляются специальные требования по уровню шума) приведен в табл. 1-8; исполнение машин по степени защиты IP44.

Машины класса 1 при степени защиты IP23 (22) должны иметь в режиме холостого хода средний уровень звука по шкале А на 3—4 дБ ниже указанного в табл. 1-8.

Собственная вибрация двигателей характеризует точность изготовления деталей и качество сборки. В значительной степени она определяет надежность машины и прежде всего подшипниковых узлов. Значения допу-

Таблица 1-8

Номинальная мощность P_2 , кВт	L_{d1A} , дБ, для номинальных частот вращения, об/мин				
	от 600 до 900	свыше 900 до 1320	свыше 1320 до 1900	свыше 1900 до 2360	свыше 2360 до 3150
Свыше 0,25 до 1,1	67	70	71	74	75
Свыше 1,1 до 2,2	69	70	73	78	80
Свыше 2,2 до 5,5	72	74	77	82	83
Свыше 5,5 до 11	75	78	81	86	87
Свыше 11 до 22	78	82	85	87	91
Свыше 22 до 37	80	84	86	89	92
Свыше 37 до 55	81	86	88	92	94
Свыше 55 до 110	84	89	92	93	96
Свыше 110 до 220	87	91	94	96	98
Свыше 220 до 400	88	92	96	98	99

стимых вибрационных скоростей электрических машин установлены ГОСТ 16921-71. Требования этого стандарта, предъявляемые к машинам общего назначения, приведены в табл. 1-9.

Таблица 1-9

Высота оси вращения, мм	<80	80—132	132—225	>225
Класс вибрации $v_{эф\ max}$, мм/с	1,1	1,8	2,8	4,5

к) Требования к конструкции

Конструкция двигателей должна обеспечивать:

- 1) функционирование и сохранение технических параметров в течение заданного срока службы;
- 2) заданную степень защиты;
- 3) максимальную унификацию деталей и сборочных единиц двигателей различных форм исполнений, модификаций и специализированных исполнений. Примером

такой унификации могут служить отечественные серии А, А2 и 4А, а также некоторые серии зарубежных фирм, например серия М шведской фирмы АСЕА, построенная на основе блочного принципа таким образом, что преобразование основного исполнения в одну из модификаций осуществляется изменением одной или двух сборочных единиц базовой модели.

4) охлаждение машины в соответствии с допускаемой температурой ее частей при минимальных потерях на охлаждение и наименьшем вентиляционном шуме. Система охлаждения двигателя должна соответствовать его степени защиты, функциональному назначению, степени сложности конструкции и стоимости машины;

5) минимальные уровни шума и вибрации механического происхождения;

6) механическую прочность деталей, узлов и всей машины в целом, а также стабильность размеров как при изготовлении, так и при эксплуатации при минимальных габаритах и массе. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды установлены ГОСТ 17516-72. Электродвигатели общего назначения относятся к группе М1 этого стандарта;

7) производственную технологичность в условиях крупносерийного и массового производства: возможность применения прогрессивной технологии и автоматизированного оборудования в максимуме технологических операций;

8) удобство монтажа, а именно: наличие транспортных колец или выступов для перемещений при установке на объектах; наличие специальных устройств для подключения (вводных устройств), обеспечивающих удобное и надежное подключение питающих кабелей в соответствующей арматуре, их закрепление и защиту токоведущих частей; удобство заводки и установки фундаментных болтов или болтов крепления фланцев;

9) минимальную потребность в регулярном обслуживании при эксплуатации и удобство такого обслуживания;

10) безопасность обслуживания машины, т.е. защиту от вращающихся и токоведущих частей, возможность монтажа защитного заземления и обеспечение безопасной температуры корпуса;

11) ремонтпригодность, т.е. приспособленность к обнаружению и предупреждению причин отказов и по-

вреждений и устранению их последствий путем проведения технического обслуживания или ремонтов. При этом время и стоимость восстановления работоспособности двигателя не должны превышать заданных значений;

12) эстетическую форму и хороший товарный вид, сохраняемость товарного вида после длительного хранения и эксплуатации.

л) Надежность и долговечность

Требования к надежности асинхронных двигателей общего назначения и стандартизация показателей надежности были введены в СССР впервые в мировой практике применительно к двигателям серии 4А. Для того чтобы сформулировать требования к этим параметрам, следует прежде всего установить технический ресурс двигателя, определяемый техническим ресурсом его статорной обмотки. Исходя из условий эксплуатации в номинальном режиме при температурах, близких к предельно допустимым для принятого класса нагревостойкости системы изоляции, принят ресурс 20 000 ч. После установления технического ресурса следует установить экономически целесообразную вероятность безотказной работы (в течение заданной наработки). Для современных серий, построенных на применении эмаль-провода и синтетических изоляционных материалов, экономически целесообразная вероятность безотказной работы составит 0,8—0,85 за 20 000 ч.

Долговечность двигателей может быть задана гамма-процентным ресурсом, т. е. наработкой в 20 000 ч с вероятностью 80—85%. Следует отметить, что заданные показатели надежности и долговечности гарантируются при условии эксплуатации двигателей в режимах, близких к номинальным в части температуры, числа пусков, условий окружающей среды, механических воздействий и др., а также при обеспечении надлежащей защиты от перегрузок и других аварийных режимов и соблюдении правил эксплуатации и технического обслуживания.

м) Экономичность

Исходя из масштабов производства низковольтных асинхронных двигателей и их энергопотребления, эконо-

мичность является главным критерием при оценке тех или иных вариантов конструкции двигателей массовых серий. Считая главным критерием экономичности новых серий снижение общих затрат в народном хозяйстве, следует задаваться при проектировании целью получения минимума затрат на разработку, освоение, производство и эксплуатацию двигателей. Более подробно вопросы экономичности асинхронных двигателей рассматриваются в гл. 13.

1-2. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ

ГОСТ 2.103-68 устанавливает следующие стадии разработки: техническое задание; технические предложения; эскизный проект; технический проект; разработка рабочей документации — рабочий проект; установочные серии.

Рассмотрим этапы разработки, их назначение и содержание применительно к серии асинхронных двигателей. При этом этап технического предложения не будет рассматриваться, так как разработка серии предшествуют научно-исследовательские работы.

а) Техническое задание

Проектированию серии должна предшествовать разработка технического задания. Как правило, разрабатываются три технических задания:

техническое задание на проектирование серии (техническое задание на конструкцию). Этот документ содержит технические требования, рассмотренные в § 1-1, как к серии в целом, так и к отдельным ее модификациям;

техническое задание на материалы. Этот документ содержит требования к основным электротехническим (а иногда и конструкционным) материалам;

техническое задание на технологию, содержащее требования к технологическим процессам на всех стадиях изготовления двигателей в части обеспечения размеров и точностных параметров элементов конструкции, а также степени механизации и автоматизации производственных процессов и уровня производительности труда.

Кроме технических требований, в технических заданиях указываются основные этапы работ, сроки их выполнения и службы (организации и предприятия), выполняющие эти этапы. Техническое задание должно быть рассмотрено и согласовано с основными заказчиками и потребителями асинхронных двигателей, а также с заводскими-изготовителями.

б) Эскизный проект

Эскизный проект разрабатывается для установления принципиальных решений, связанных с разработкой серии асинхронных двигателей. На стадии разработки эскизного проекта производятся:

сравнительная оценка вариантов и предварительный выбор электротехнических материалов: электротехнической стали, обмоточных проводов, компонентов системы изоляции;

сравнительная оценка вариантов и выбор соотношений чисел пазов и размеров открытия пазов статора и ротора, а также воздушного зазора; выбор скоса пазов и укорочения шага обмотки. Сравнительная оценка вариантов указанных параметров производится по данным расчетов добавочных потерь, добавочных моментов и магнитного шума;

сравнительная оценка и выбор исходных данных для проведения поисковых расчетов двигателей: наружного диаметра сердечников, вида и параметров статорных и роторных обмоток и др.;

сравнительная оценка вариантов и выбор принципиальной конструктивной схемы двигателей, материала оболочек и вида системы охлаждения;

поисковые расчеты наиболее напряженных двигателей для всех чисел полюсов каждой высоты оси вращения; анализ этих расчетов, разработка конструкции и технической документации на макетные образцы;

изготовление и испытания макетных образцов, корректировка исходных данных для технического проекта;

разработка технических решений по обеспечению заданных показателей надежности; расчет надежности характерных представителей серии;

предварительная проработка основных вопросов технологии и оценка технологичности предварительной конструкции;

предварительная проработка вопросов унификации и стандартизации, оценка показателей унификации и стандартизации;

проработка вопросов технической эстетики и эргономики; разработка художественно-конструкторского проекта;

проверка основных конструктивных решений на патентную чистоту и патентоспособность.

Эскизный проект, содержащий решение по перечисленным вопросам, рассылается на отзыв и согласование заинтересованным организациям и по получении отзывов рассматривается на научно-техническом совете отрасли.

в) Технический проект

Технический проект разрабатывается для установления окончательных технических решений, связанных с разработкой серии асинхронных двигателей. На стадии разработки технического проекта производится:

окончательный выбор электротехнических материалов и согласование заявок на возможность их поставок;

выполнение поверочных расчетов и разработка конструкции двигателей;

изготовление и испытание экспериментальных образцов с целью проверки принятых решений; оценка надежности конструкции;

технологический анализ конструкции двигателей для определения возможности применения прогрессивных технологических процессов и автоматизированного оборудования с целью существенного повышения производительности труда, а также определения возможности применения действующего оборудования; выявление не-

обходимости создания нового оборудования и обоснование его разработки или приобретения. Для сокращения сроков освоения новой серии в производстве на стадии технического проекта разрабатываются специальные чертежи изделий, служащие основой для проектирования и заказа оборудования и разработки типовых технологических процессов;

оценка технического уровня и конкурентоспособности двигателей новой серии в сравнении с аналогичными изделиями отечественного и зарубежного производства;

стандартизационная, эстетико-эргономическая и патентная оценка изделий, проверка соответствия конструкции требованиям техники безопасности;

предварительный расчет экономической эффективности новой серии.

Технический проект проходит те же стадии рассмотрения и согласования, что и эскизный. Согласованный и утвержденный технический проект служит основой для разработки рабочего проекта.

г) Рабочий проект

Рабочий проект включает:

разработку конструкторской документации для изготовления опытных образцов и опытных партий двигателей новой серии всех габаритов и типоразмеров;

изготовление и испытание опытных образцов;

корректировку конструкторской документации по результатам испытаний опытных образцов;

государственные, межведомственные испытания опытных образцов и корректировку документации по результатам этих испытаний;

разработку проекта государственного стандарта на серию двигателей.

д) Установочные серии

Установочные серии двигателей выпускаются заводом — изготовителем серийной продукции по типовым технологическим процессам на штатном технологическом оборудовании. Двигатели установочных серий подвергаются квалификационным испытаниям на подтверждение возможности получения заданных параметров в серийном производстве. По данным изготовления и испытаний установочных серий производится корректировка технической документации для серийного производства. Данные испытаний установочных серий служат основой для разработки окончательной редакции технических условий или стандарта на двигатели новой серии.

Планируя разработку новой серии асинхронных двигателей, следует обратить особое внимание:

на параллельную разработку конструкции и технологии, обеспечивающую единство конструктивных и технологических решений, одновременную разработку технологических процессов и оборудования, а также своевременное оснащение предприятий оборудованием для серийного производства;

на комплексность разработки: одновременно с разработкой двигателей должна разрабатываться аппаратура управления и защиты,

соответствующая параметрам разрабатываемых машин. Только соблюдение этих условий может обеспечить правильную эксплуатацию двигателей, их надежность и долговечность.

Разработка новой серии асинхронных двигателей является комплексной проблемой, в решении которой участвуют десятки предприятий и организаций. Правильная организация работ в таком комплексе в значительной мере определяет их успех. В отечественной практике управление работами по созданию серии ведется на основе сетевого планирования.

1-3. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Исходя из основных законов и соотношений, для электрической машины можно записать выражение, связывающее потребляемую мощность P_1 и частоту вращения n с главными размерами — диаметром якоря D_i и его расчетной длиной l_1 :

$$P_1 = k D_i^2 l_1 n, \quad (1-4)$$

где k — постоянная, характеризующая уровень использования активной части.

Для асинхронного двигателя

$$k = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{A_1 B_\delta}{60} \frac{k_{об1}}{k_E}, \quad (1-5)$$

здесь A_1 — линейная нагрузка; B_δ — максимальная индукция в воздушном зазоре; $k_{об}$ — обмоточный коэффициент статорной обмотки; $k_E = E_1/U_1$, E_1 — э. д. с. статорной обмотки.

Многие авторы (Эссон, Арнольд, Видмар, Рихтер, Шенфер, Постников и др.), разрабатывая методы определения главных размеров электрических машин на основе машинной постоянной C , равной $1/k$, придавали ей различные формы [4]. Метод определения главных размеров для ряда (серии) машин с помощью машинной постоянной имеет существенные недостатки:

1) машинная постоянная не учитывает всего многообразия различных и, как показано выше, часто противоречивых требований, которым должна удовлетворять серия машин. А эти требования предопределяют не только второстепенные, но и главные размеры.

2) выражение (1-4) не охватывает всех размеров машин, и, в частности, не касается воздушного зазора, числа и размеров пазов и других параметров, которые в свою очередь влияют на выбор главных размеров;

3) машинная постоянная не является постоянной для серии машин, так как ее составляющие A_1 и B_δ изменяются с изменением размеров машин, при этом изменяется также и общее рассеяние машины [5]. Сказанное позволяет заключить о недостаточности метода машинной постоянной в практических целях для проектирования серии асинхронных двигателей. Однако метод машинной постоянной позволяет подытожить и применить опыт и данные о выпускаемых машинах при определении исходных данных для проектирования новых серий. Метод машинных постоянных может быть использован также при проектировании индивидуальных машин.

Расчет электрических машин, даже если ограничиться только электромагнитными соотношениями, — задача неопределенная, в которых число неизвестных больше числа уравнений. Решение таких задач методом вариантов чрезвычайно трудоемко. Так, в (1-4) и (1-5) четыре неизвестные (D_i , l_1 , B_δ , A_1). Если для каждой величины проверить m вариантов, то при этом необходимо выполнить m^4 расчетов. Для того чтобы сделать задачу более определенной, необходимо привлечь экономические, технологические и другие соображения. Использование ЭВМ в этом случае позволяет учесть значительно больше данных и связей, чем это возможно при использовании уравнения (1-4) и машинной постоянной, и оптимизировать расчеты по заранее выбранным критериям, т. е. применить метод оптимального проектирования.

Задачей оптимального проектирования является определение размеров активной части оптимального двигателя, удовлетворяющего поставленным техническим требованиям с учетом ограничений эксплуатационного и технологического характера. Критерием оптимизации при проектировании серии асинхронных двигателей, как правило, является минимум приведенных затрат на изготовление и эксплуатацию двигателей за нормативный срок окупаемости. Благодаря своей эффективности, а также возможности учета большого числа разнообразных факторов и связей метод оптимального проектирования с применением ЭВМ является главным при разработке серий асинхронных двигателей.

Следует отметить, что результаты оптимизационных расчетов уточняются проверкой на последующих стади-

ях разработки при испытании опытных машин и проведении детальных поверочных расчетов.

1-4. РАСЧЕТЫ, ПРОВОДИМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ. ВЗАИМОСВЯЗЬ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТОВ

При преобразовании электрической энергии в механическую элементы асинхронного двигателя испытывают электрические, магнитные, тепловые и механические нагрузки. Преобразование энергии в асинхронном двигателе должно быть экономичным и осуществляться с заданной надежностью. Для определения нагрузок и выбора размеров элементов асинхронного двигателя в соответствии с этими нагрузками и с учетом экономических и технологических факторов, а также показателей надежности при проектировании асинхронных двигателей проводится ряд расчетов:

1) электромагнитный расчет, определяющий электрические и магнитные нагрузки, рабочие и пусковые характеристики машины, а также основные потери;

2) расчет пуска, определяющий потери энергии при пуске и время пуска — параметры, необходимые для расчета нагрева при работе с частыми пусками или большими маховыми массами;

3) расчет добавочных потерь и добавочных моментов, определяющий высшие гармонические магнитного поля в воздушном зазоре машины и характеризующий качественно и количественно явления, вызванные высшими гармоническими, — добавочные потери и добавочные моменты;

4) вентиляционный расчет, определяющий параметры вентиляционной системы машины, а также количество и скорость охлаждающего агента, протекающего по вентиляционному тракту;

5) тепловой расчет, определяющий на основе данных электромагнитного расчета (основные потери), расчета добавочных потерь, и вентиляционного расчета (теплопередача) температуру активных и конструктивных элементов двигателя;

6) механический расчет, определяющий механические нагрузки конструктивных элементов машины и проверяющий механическую прочность конструкции при этих нагрузках;

7) расчет размерных цепей, определяющий систему допусков, связанных с изготовлением элементов двигателя и обеспечивающих его сборку и функционирование;

8) расчет шумов и вибраций, определяющий уровни шума и вибрации двигателя, вызванные радиальными силами электромагнитного происхождения, вентиляционные шумы, а также механические шумы и вибрации, вызванные работой подшипников, неуравновешенностью вращающихся частей и другими источниками механического происхождения;

9) расчет надежности, определяющий по уровню воздействующих факторов и статистической дефектности элементов конструкции показатели надежности двигателя;

10) экономический расчет, определяющий затраты на производство и эксплуатацию двигателей, и достигаемый при внедрении новых разработок экономический эффект.

Методы проведения перечисленных расчетов и их обоснования рассмотрены в соответствующих главах книги.

Расчеты, проводимые при проектировании серии асинхронных двигателей, по своему назначению разделяются на поисковые и поверочные. Задачей поискового расчета является определение размеров активной части оптимального двигателя (см. гл. 3).

Вопросы определения основных исходных данных для оптимального проектирования подробно рассмотрены в гл. 2.

Данные поисковых расчетов наиболее напряженных в тепловом отношении машин всех чисел полюсов каждой высоты оси вращения (обычно эти машины наибольших длин) служат основой для проработки конструктивных схем и определения основных размеров и параметров конструкции: элементов оболочки, подшипников и подшипниковых узлов, вентиляционной системы и других — необходимых для проектирования опытных образцов. Проверенные и откорректированные по результатам испытаний опытных машин данные поисковых расчетов служат основой для проведения детальных поверочных расчетов.

Поверочный расчет включает в себя электромагнитный, вентиляционный, тепловой, механический, размерный и экономический расчеты. Поверочные расчеты базируются на заданных размерах и параметрах активной части и конкретных размерах конструктивных элементов двигателей. Расчеты добавочных потерь и добавочных моментов, а также расчет шумов и вибраций магнитного происхождения, как правило, проводятся на более ранних стадиях разработки, предшествующих поисковым расчетам, с целью выбора размеров и соотношений активной части, при которых эти явления были бы минимальными. К таким параметрам относятся: соотношение чисел полюсов статора и ротора, воздушный зазор между статором и ротором, некоторые размеры пазов статора и ротора (размеры открытий, высота мостика и др.), укорочение шага обмотки и др. Расчет вентиляционного шума проводится при выборе вариантов конструкции вентиляционной системы, расчет надежности статорной обмотки — при выборе материалов и конструкции изоляционной системы и определении технологии укладки обмотки, расчет долговечности подшипников — при выборе подшипников и разработке конструкции подшипниковых узлов.

Глава вторая

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1-1. ШКАЛА МОЩНОСТЕЙ, ШКАЛА УСТАНОВОЧНЫХ РАЗМЕРОВ И ИХ ВЗАИМНАЯ УВЯЗКА

а) Шкала мощностей

Шкала мощностей современных серий асинхронных двигателей представляет собой стандартизированный ряд значений номинальных мощностей P_2 , расположенных в возрастающем порядке и соответствующих, как

правило, ряду предпочтительных чисел R40 (ГОСТ 8032-56). В заданном для серии машин диапазоне мощностей шкала характеризуется числом ступеней z_P или коэффициентом нарастания мощности k_{HP2} , который определяется отношением последующей мощности ряда P_{2n+1} к предыдущей P_{2n} :

$$k_{HP2} = P_{2n+1}/P_{2n}, \quad (2-1)$$

где $n=1, 2, \dots, z_P-1$.

Коэффициент нарастания мощности влияет на стоимость изготовления двигателей, уменьшая или увеличивая их серийность. С другой стороны, от значения k_{HP2} зависит коэффициент использования двигателя по мощности. Характер этой зависимости можно выяснить, исходя из следующих соображений.

Во всех случаях, когда требуется двигатель, мощность которого больше P_{2n} , но меньше P_{2n+1} , будет установлен двигатель мощностью P_{2n+1} . Если в диапазоне между P_{2n} и P_{2n+1} требуется m двигателей, то исходя из условий равной вероятности мощности этих двигателей должны распределяться равномерно по всему диапазону. При расчете суммарной мощности двигателей такое предположение равносильно предположению о потребности m двигателей средней мощности:

$$\frac{P_{2n} + P_{2n+1}}{2} = P_{2n} \frac{k_{HP2} + 1}{2}. \quad (2-2)$$

Таким образом, суммарная мощность, потребная в данном диапазоне, согласно расчету приводов будет $mP_{2n}(k_{HP2}+1)/2$, фактически же установленная мощность составит $mk_{HP2}P_{2n}$, а избыточная мощность

$$mk_{HP2}P_{2n} - mP_{2n} \frac{k_{HP2} + 1}{2} = mP_{2n} \frac{k_{HP2} - 1}{2}. \quad (2-3)$$

Отношение избыточной мощности к действительно потребной (коэффициент использования по мощности)

$$\Delta P_2 = \frac{2mP_{2n}(k_{HP2} - 1)}{2mP_{2n}(k_{HP2} + 1)} = \frac{k_{HP2} - 1}{k_{HP2} + 1}. \quad (2-4)$$

Значение ΔP_2 в функции коэффициента нарастания мощности приведено на рис. 2-1.

Коэффициент нарастания в большинстве случаев не является постоянным для всей шкалы, а уменьшается по мере роста номинальной мощности. Это вполне оправда-

но, так как двигатели малой мощности, работающие в основном во вспомогательных приводах и менее определенных режимах нагружения, выбираются с меньшей степенью точности. Меньшее число ступеней мощности для малых двигателей целесообразно также и с точки зрения организации их массового производства. Для построения рационального ряда с убывающим коэффициентом нарастания целесообразно разбиение шкалы мощностей на участки, в пределах которых величина k_{HP2} примерно постоянна.

Для участка шкалы мощностей с числом ступеней z_P и постоянным k_{HP2} справедливо выражение:

$$\lg k_{HP2} = \frac{\lg P_{2max} - \lg P_{2min}}{z_P - 1}, \quad (2-5)$$

где P_{2max} и P_{2min} — предельные значения мощностей участка шкалы.

Публикация 72 МЭК рекомендует два предпочтительных ряда номинальных мощностей — основной и дополнительный. Основной ряд охватывает диапазон мощностей от 0,06 до 250 кВт, дополнительный — может использоваться для промежуточных значений. Публикация 72 МЭК легла в основу ГОСТ 12139-74, устанавливающего ряд номинальных мощностей для всех видов электрических машин (табл. 2-1).

Коэффициент нарастания мощности ряда, рекомендуемого МЭК и установленного ГОСТ 12139-74, изменяется неравномерно и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением мощности. Неравномерность изменения k_{HP2} , как будет показано далее, приводит к затруднениям при проектировании серий асинхронных двигателей и значительно усложняет их производство. Эти обстоятельства побудили МЭК к пересмотру рекомендаций, приведенных в публикации 72. Один из вариантов перспективных рядов номинальных мощностей, рассматриваемых в МЭК, приведен табл. 2-1.

Следует иметь в виду, что изменение стандартизованного ряда мощностей потребует серьезной перестрой-

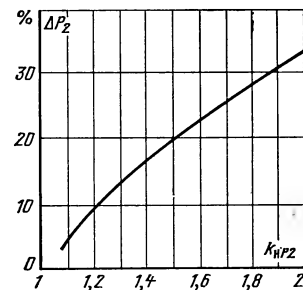


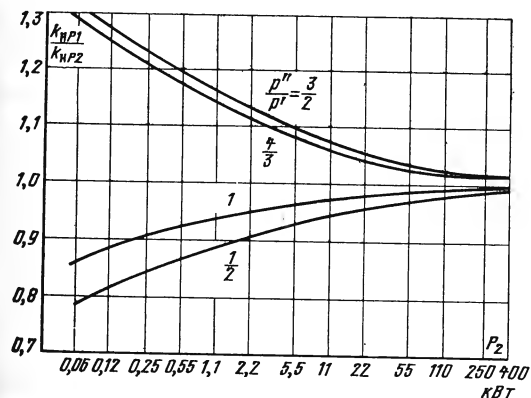
Рис. 2-1. Зависимость $\Delta P_2 = f(k_{HP2})$.

Таблица 2-1

Публикация 72 МЭК			ГОСТ 12139-74		Перспективный ряд	
Основной ряд		Дополни- тельный ряд				
P_2 , кВт	k_{HP2}	P_2 , кВт	P_2 , кВт	k_{HP2}	P_2 , кВт	k_{HP2}
1	2	3	4	5	6	7
0,06	—	—	0,06	—	0,063	—
0,09	1,500	—	0,09	1,500	0,10	1,587
0,12	1,333	—	0,12	1,333	0,14	1,400
0,18	1,500	—	0,18	1,500	0,20	1,428
0,25	1,389	—	0,25	1,389	0,28	1,40
0,37	1,480	—	0,37	1,480	0,40	1,428
0,55	1,486	—	0,55	1,486	0,56	1,400
0,75	1,364	—	0,75	1,364	0,80	1,428
1,1	1,467	—	1,1	1,467	1,1	1,375
1,5	1,364	1,8	1,5	1,364	1,6	1,454
2,2	1,467	—	2,2	1,467	2,2	1,375
3,0	1,364	—	3,0	1,364	3,2	1,454
4,0	1,330	3,7	4,0	1,330	4,5	1,406
5,5	1,375	—	5,5	1,376	—	—
—	—	6,3	—	—	6,0	1,333
7,5	1,364	—	7,5	1,364	8,0	1,333
11,0	1,467	10	11,0	1,467	11	1,375
15,0	1,364	13	15,0	1,364	15	1,364
18,5	1,233	17	18,5	1,233	—	—
22	1,189	20	22	1,189	20	1,333
—	—	25	—	—	25	1,250
30	1,364	33	30	1,364	32	1,280
37	1,233	40	37	1,233	40	1,250
45	1,216	—	45	1,216	—	—
55	1,222	50	55	1,222	50	1,250
75	1,364	63	75	1,364	63	1,260
90	1,200	80	90	1,200	80	1,270
110	1,222	100	110	1,222	100	1,250
132	1,200	125	132	1,200	125	1,250
160	1,212	—	160	1,212	160	1,280
200	1,25	—	200	1,250	200	1,250
250	1,25	—	250	1,250	250	1,250
—	—	—	315	1,260	315	1,260
—	—	—	355	1,127	355	1,127
—	—	—	400	1,127	400	1,127

ни структур машин, приводимых асинхронными двигателями. Поскольку это затрагивает почти все без исключения отрасли промышленности и связано с большими затратами, то изменение ряда мощностей может быть проведено в исключительных и строго обоснованных случаях.

При проектировании серии асинхронных машин необходимо знать коэффициент нарастания подводимой

Рис. 2-2. Зависимость $k_{HP1}/k_{HP2} = f(P_2)$.

мощности P_1 , которая определяет основные размеры машины. Отношение подводимой мощности к полезной для закономерного ряда определяется выражением:

$$P_1/P_2 = 1/\cos \varphi \eta = 1 + (Ap + C) P_2^{-B}, \quad (2-6)$$

где η — к. п. д. двигателя; A , B , C — постоянные, зависящие от энергетических показателей данной серии.

Из выражения (2-6) определим подводимую мощность P_1 :

$$P_1 = P_2 [1 + (Ap + C) P_2^{-B}]$$

и найдем коэффициент нарастания подводимой мощности k_{HP1} :

$$k_{HP1} = \frac{P_{1n+1}}{P_{1n}} = k_{HP2} \frac{1 + (Ap + C) P_{2n+1}^{-B}}{1 + (Ap + C) P_{2n}^{-B}}. \quad (2-7)$$

Для современных серий асинхронных машин приводимые в (2-6), (2-7) постоянные принимают следующие

значения: $A \approx 0,14$; $B = 0,3 \div 0,5$ (в среднем $B = 0,4$)*; $C = 0,4 \div 0,45$. Используя (2-7), можно получить зависимость отношения коэффициентов нарастания подводимой и номинальной мощностей от номинальной мощности как при неизменном числе пар полюсов, так и при переходе с p' пар полюсов на p'' пар полюсов (рис. 2-2).

6) Шкала установочных размеров

Шкала установочных размеров определяет основные установочные размеры машины (рис. 2-3) в зависимости от высоты оси вращения h , условной длины станины. Вы-

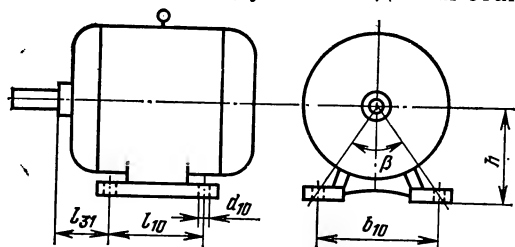


Рис. 2-3. Основные установочные размеры асинхронного двигателя.

сота оси вращения h является главным установочным размером, по которому производится сопряжение электродвигателя с приводимым механизмом, и, кроме того, высота оси вращения и соответствующий ей внешний диаметр сердечника служат базовыми размерами при разработке технологического оборудования.

ГОСТ 13267-73 устанавливает для электрических и сопрягаемых с ними неэлектрических машин высоты оси вращения, представляющие собой ряд предпочтительных чисел R20 с дополнительно включенными из ряда R40 (ГОСТ 8032-56) значениями 132, 236 и 600 и ограничением применения значений 225, 140, 236 и 600.

Публикация 72 МЭК рекомендует шкалы установочных размеров для электрических машин на лапах с высотами оси вращения 56—400 мм и для электрических машин фланцевого крепления с размерами фланцев (по окружности крепительных отверстий) от 55 до 1080 мм.

* Расчеты показывают, что разброс значений коэффициента в пределах 0,3—0,5 практически не влияет на значение $k_{нр1}$.

Таблица 2-2

A , мм	Условное обозначение длины станины	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}
56		90	71	36	5,8
63		100	80	40	7
71	—	112	90	45	7
80		125	100	50	10
90	S	140	100	56	10
	L	140	125	56	10
100	S	160	112	63	12
	L	160	140	63	12
112	S	190	114	70	12
	M	190	140	70	12
	(L)	190	159	70	12
132	S	216	140	89	12
	M	216	178	89	12
	(L)	216	203	89	12
160	S	254	178	108	15
	M	254	210	108	15
	(L)	254	254	108	15
180	S	279	203	121	15
	M	279	241	121	15
	L	279	279	121	15
200	S	318	228	133	19
	M	318	267	133	19
	L	318	305	133	19
225	S	356	286	149	19
	M	356	311	149	19
	(L)	356	356	149	19
250	S	406	311	168	24
	M	406	349	168	24
	(L)	406	406	168	24
280	S	457	368	190	24
	M	457	419	190	24
	(L)	457	457	190	24
315	S	508	406	216	28
	M	508	457	216	28
	(L)	508	508	216	28
355	S	610	500	254	28
	M	610	560	254	28
	L	610	630	254	28

Примечание. Условные длины, указанные в скобках, не рекомендуются для асинхронных двигателей.

Эти шкалы приняты большинством стран, производящих электрические машины, и легли в основу ГОСТ 18709-73. Шкала для электрических машин на лапах (табл. 2-2) построена таким образом, что в каждой высоте оси вращения могут выполняться машины, отличающиеся длиной станины. Этим длинам станины присвоены условные обозначения: S (Short) — короткая, M (Medium) — средняя, L (Long) — длинная. При этом каждому значению высоты оси вращения h и условному обозначению длины станины (S, M или L) соответствуют определенные установочные размеры b_{10} , l_{10} , l_{31} и d_{10} .

Отношения размеров b_{10} и l_{31} к размеру h примерно постоянны и в среднем $b_{10}=1,6h$; $l_{31}=0,66h$. Отношение размера l_{31} к размеру h непостоянно и увеличивается с увеличением высоты оси вращения.

В настоящее время МЭК ведет пересмотр шкалы установочных размеров. В частности, предполагается установить $b_{10} \approx 1,7h$, $l_{31} \approx 0,7h$.

Шкала установочных размеров для машин фланцевого крепления в известной степени является производной шкалы установочных размеров для машин на лапах: она не определяет главных размеров станины, а устанавливает только размеры крепительных фланцев.

в) Увязка шкалы мощностей и шкалы установочных размеров

Увязка стандартизированных шкал номинальных мощностей и высот вращения лежит в основе построения серии асинхронных двигателей.

Увязка этих шкал производится таким образом, что каждому значению номинальной мощности двигателя в зависимости от его исполнения по степени защиты и частоты вращения соответствует определенная высота оси вращения и условная длина станины (S, M или L), т. е. определенные установочные размеры. Зная связь между мощностью и установочными размерами машин, можно определить основные размеры сердечника: внешний диаметр и длину. При этом внешний диаметр сердечника статора D_{a1} , как будет показано ниже, в известной степени зависит от высоты оси вращения, а длина сердечника l_1 согласно [7] найдется из преобразованного выражения (1-4):

$$P_1 = k_n D_{a1}^{2+\alpha} l_1, \quad (2-8)$$

где k_n — коэффициент использования активной части; α — показатель степени, характеризующий изменение линейной нагрузки статора A_1 и максимальной индукции в воздушном зазоре B_δ при изменении диаметра D_{a1} .

Коэффициент k_n для данной серии асинхронных двигателей при данном числе полюсов и способе охлаждения является величиной неизменной. Между коэффициентом использования k_n и величинами, характеризующими электрические и магнитные нагрузки: A_1 и B_δ , существует зависимость:

$$k_n = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{f_1 k_{об1}}{k_E p} \frac{A_1 B_\delta k_D^2}{D_{a1}^\alpha}, \quad (2-9)$$

где f_1 — частота сети; $k_D = D_{i1}/D_{a1}$ — коэффициент внутреннего диаметра сердечника статора.

Электрические и магнитные нагрузки определяются характеристиками электротехнической стали сердечника, классом нагревостойкости системы изоляции, коэффициентом заполнения паза и характеристиками системы охлаждения.

Для вновь проектируемой серии значения k и α (2-8) могут быть найдены либо по данным экспериментального исследования опытных машин, либо на основании анализа существующих серий с учетом влияния улучшающих факторов, способствующих повышению электрических и магнитных нагрузок: повышения класса нагревостойкости, уменьшения толщины изоляции, улучшения магнитных характеристик электротехнической стали и др. Влияние улучшающих факторов на k_n будет показано ниже.

Каждой высоте оси вращения будет соответствовать один определенный внешний диаметр сердечника и в зависимости от увязки шкал мощностей и установочных размеров — одна или несколько длин сердечника статора. При одной длине сердечника в высоте оси вращения характеристики машин будут наиболее близкими к оптимальным. Однако производство серии с большим числом высот оси вращения затруднительно и требует больших капитальных затрат на литейное, штамповочное, механическое и другое оборудование. С другой стороны, наличие нескольких длин в одной высоте оси вращения влечет за собой незначительное увеличение оснастки, но приводит к некоторым отступ-

лениям от оптимальных параметров машин. С учетом этих факторов, а также больших объемов производства асинхронных двигателей общего назначения наиболее выгодно иметь две длины сердечника и две условные длины станины в каждой высоте. Однако из-за несоответствия числа ступеней шкала мощностей и высот оси вращения это не всегда удается и отдельные высоты оси вращения могут иметь одну или три длины сердечника и станины.

Часто стремятся к унификации длин сердечников двигателей, имеющих одну и ту же высоту оси вращения и условную длину станины, но разные числа полюсов. В этом случае при переходе от мощности P'_1 при числе пар полюсов p' к мощности P''_1 при числе пар полюсов p'' должно соблюдаться условие:

$$P''_1/P'_1 = k''_n/k'_n. \quad (2-10)$$

Однако, как показывает практика, более целесообразно унифицировать не длины сердечников, а размеры L_1 , состоящие из длин сердечников (l_1) и двух вылетов лобовых частей обмотки (l_b), т. е. $L_1 = l_1 + 2l_b$. Это позволяет унифицировать длины станины, валов, подшипниковые щиты, что чрезвычайно важно для массового производства. Условие унификации размеров L_1 :

$$\frac{P''_1}{P'_1} = \frac{k''_n}{k'_n} \left[1 + \frac{\pi}{(l_1/D_{a1})} \frac{k''_b \beta'_y (k'_D + k'_{hz1})}{p'} \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{k''_b \beta'_y p'}{k'_b \beta'_y p''} \frac{k''_D + k''_{hz1}}{k'_D + k'_{hz1}} \right) \right], \quad (2-11)$$

где l_1/D_{a1} — заданное для исходных параметров отношение длины сердечника к его внешнему диаметру; k_b — коэффициент вылета лобовых частей, зависящий от вида обмотки и числа пар полюсов (см. табл. 4-2); $\beta_y = y/\tau$ — шаг обмотки в долях полюсного деления; $k_{hz1} = h_{z1}/D_{a1}$ — коэффициент высоты зубцов статора.

От отношения подводимых мощностей P''_1/P'_1 , используя (2-6) и (2-7), можно перейти к отношению номинальных мощностей.

Обычно при структурной компоновке серии асинхронных двигателей за основу принимается увязка ряда номинальных мощностей с рядом высот оси вращения для

четырёхполюсных двигателей, как наиболее массовых. Увязка рядов мощностей с установочными размерами для двигателей с иным числом пар полюсов производится с учетом заданных принципов унификации длин сердечников (2-10) или лучше полных длин (2-11). При этом очевидно, что номинальная мощность при изменении числа пар полюсов может изменяться только дискретно в соответствии с коэффициентом нарастания ря-

Таблица 2-3

p''/p'	Отношения коэффициентов и мощностей при переходе числа полюсов от $2p'$ к $2p''$				
	k''_D/k'_D	k''_{hz1}/k'_{hz1}	k''_n/k'_n		P''_1/P'_1
			$h = 71 \div 132$ мм	$h = 160 \div 250$ мм	
2/4	0,55/0,65	0,82/0,85	1500/1250	1750/1350	1,1
4/4	0,70/0,65	0,88/0,85	950/1250	1100/1350	0,9
8/4	0,70/0,65	0,88/0,85	750/1250	950/1350	0,76
					1,4—1,1 0,70—0,88 0,60—0,73

да. Это обстоятельство делает весьма затруднительной унификацию длин l_1 или L_1 двигателей с одним и тем же внешним диаметром сердечника, но разным числом пар полюсов при сохранении оптимального уровня использования активной и конструктивной частей.

В табл. 2-3 приведены ориентировочные значения P''_1/P'_1 и P''_2/P'_2 при переходе от $2p=2; 6; 8$ к $2p=4$, полученные по (2-7) и (2-11), исходя из унификации длин L_1 (при $l_1/D_{a1}=0,65$ для $2p=4$). Там же даны средние значения отношений коэффициентов k_D , k_{hz1} и k_n , характерных для асинхронных двигателей серии 4А с высотами оси вращения $h=71 \div 250$ мм (до 100 кВт) и исполнением по степени защиты IP44.

Из рис. 2-2 видно, что отношение k_{nP1}/k_{nP2} при изменении числа пар полюсов существенно отличается от 1 при малых мощностях и становится близким к 1 при увеличении номинальной мощности. По этой причине отношение P''_2/P'_2 (табл. 2-3) соответственно изменяется с изменением P_2 , что в ряде случаев приводит к необходимости структурных сдвигов увязки рядов мощностей и высот оси вращения. Так, двухполюсные двигатели со степенью защиты IP44 и P_2 до 5,5—7,5 кВт имеют мощность на одну ступень больше, чем четырехполюсные

двигатели с той же высотой оси вращения. При больших значениях P_2 номинальные мощности двух- и четырех- полюсных двигателей принимаются одинаковыми (см. табл. 15-1).

Следует отметить, что неравномерность изменения коэффициента нарастания мощности затрудняет унификацию длин станин двигателей с различным числом пар

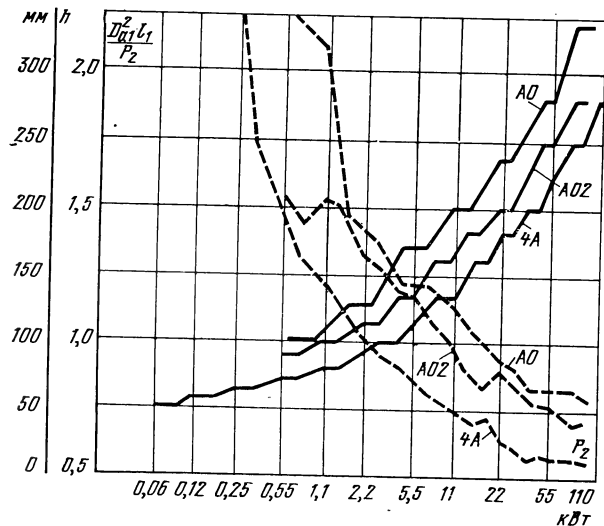


Рис. 2-4. Высота оси вращения (—) и объем активной части на единицу мощности (---) четырехполюсных двигателей отечественных серий.

полюсов одной высоты оси вращения (2-11), так как приводит к большому разбросу длин сердечников.

Увязка шкал мощностей и установочных размеров неодинакова для двигателей различных исполнений по степени защиты. Так, двигатели со степенью защиты IP22 или IP23, начиная с определенной высоты оси вращения, характеризуются внешним (предельным) диаметром сердечника $D_{a1кр}$, могут иметь большую номинальную мощность, чем двигатели со степенью защиты IP44. Значение $D_{a1кр}$ зависит от эффективности системы охлаждения [8] и может быть определено из (2-8):

$$D_{a1кр} = (k_{иIP44}/k_{иIP23})^{1/[(2+\alpha)_{IP23}-(2+\alpha)_{IP44}]} \quad (2-12)$$

Это послужило причиной того, что двигатели со степенью защиты IP23 предусматриваются в сериях асинхронных машин только начиная с определенной высоты оси вращения, соответствующей $D_{a1} > D_{a1кр}$, так как при прочих равных условиях двигатели со степенью защиты IP44 более предпочтительны: они универсальнее в применении и обладают большей надежностью.

Характер увязки шкал мощностей и установочных размеров, зависит в известной степени от уровня использования активных и конструктивных элементов машин. Это, в свою очередь, определяется свойствами электротехнических материалов (толщиной и нагревостойкостью корпусной и витковой изоляции, магнитными свойствами и удельными потерями электротехнической стали) и рациональностью конструкции (оптимальными размерами, соотношениями активной части и эффективностью системы охлаждения). Тенденции к снижению материалоемкости машин и повышению их компактности обуславливали все более и более «напряженную» увязку шкал мощностей и установочных размеров, что можно наблюдать на примере отечественных серий низковольтных асинхронных двигателей АО (1950 г.), АО2 (1960 г.) и 4А (1970 г.) (рис. 2-4).

Увязка мощностей с установочными размерами для двигателей со степенью защиты IP44 ряда отечественных и зарубежных серий приведена в табл. 2-4.

2-4. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

а) Электротехническая сталь

При проектировании серии асинхронных двигателей основными исходными параметрами электротехнической стали являются кривая намагничивания и удельные потери.

Кривая намагничивания — зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B(H)$ — не имеет точного аналитического выражения и при проектировании задается либо таблично, либо в виде ряда выражений, аппроксимирующих участки кривой $B(H)$.

Способность к намагничиванию электротехнической стали в первом приближении может быть оценена по одной или нескольким характерным точкам кривой $B(H)$.

Таблица 2-4

Мощность, кВт, при числе полюсов													
Высота оси вращения, мм	Условная длина станины	2p=2				2p=4				2p=6			
		Серия HSB («Вестин-Груз», США ¹)	Серия 1LA ФРГ ² («Сименс»)	Серия AO2 (СССР)	Серия 4A (СССР)	Серия HSB («Вестин-Груз», США ¹)	Серия 1LA ФРГ ² («Сименс»)	Серия AO2 (СССР)	Серия 4A (СССР)	Серия HSB («Вестин-Груз», США ¹)	Серия 1LA ФРГ ² («Сименс»)	Серия AO2 (СССР)	Серия 4A (СССР)
56	—	—	0,09	—	0,18	—	0,06	—	0,12	—	—	—	—
63	—	—	0,12	—	0,25	—	0,09	—	0,18	—	—	—	—
71	—	—	0,18	—	0,37	—	0,12	—	0,26	—	—	—	—
80	—	—	0,25	—	0,55	—	0,18	—	0,37	—	—	—	—
90	—	—	0,37	—	0,75	—	0,25	—	0,55	—	—	—	—
100	—	—	0,55	—	1,1	—	0,37	—	0,75	—	—	—	—
112	—	—	0,75	—	1,5	—	0,55	—	1,1	—	—	—	—
132	—	—	1,1	—	2,2	—	0,75	—	1,5	—	—	—	—
150	—	—	1,5	—	3	—	1,1	—	2,2	—	—	—	—
160	—	—	2,2	—	4	—	1,5	—	3	—	—	—	—
180	—	—	3,0	—	5,5	—	2,3	—	4	—	—	—	—
200	—	—	4,0	—	7,5	—	4	—	5,5	—	—	—	—
225	—	—	5,5	—	11	—	5,5	—	7,5	—	—	—	—
250	—	—	7,5	—	—	—	7,5	—	11	—	—	—	—
280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
315	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
355	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

¹ Аналогичную структуру имеют серии других фирм, соответствующие стандартам NEMA на частоту 60 Гц.

² Аналогичную структуру имеют серии других фирм, соответствующие стандартам CENEL.

³ Аналогичную структуру имеют серии других стран СЭВ, соответствующие рекомендациям по стандартизации СЭВ РС 3031-71.

Чаще всего это индукция при напряженности магнитного поля $H=2500$ А/м.

Различие кривых намагничивания при сравнении марок стали ориентировочно оценивается коэффициентом k_B :

$$k_B = B''_{2500}/B'_{2500} \quad (2-13)$$

Улучшение магнитных свойств стали может быть реализовано как уменьшение объема сердечника, а следовательно, и заготовительной массы стали. При постоянном внешнем диаметре D_{a1} уменьшение длины сердечника и заготовительной массы стали пропорционально коэффициенту g_c :

$$g_c = l_1'/l_1 = 1/k_B \quad (2-14)$$

При постоянной длине сердечника уменьшение заготовительной массы стали вследствие уменьшения внешнего диаметра сердечника D_{a1} пропорционально:

$$g_c = (D''_{a1}/D'_{a1})^2 = k_D + (1 - k_D)/k_B \quad (2-15)$$

Выражения (2-14) и (2-15) являются сугубо оценочными.

Следует отметить, что эффективность улучшения магнитных свойств стали будет несколько иной, так как в (2-14) и (2-15) не учитываются вторичные явления. С одной стороны — это уменьшение длины витка, уменьшение потерь в обмотках и уменьшение реактивных сопротивлений рассеяния за счет уменьшения длины сердечника (2-14) или уменьшение реактивных сопротивлений рассеяния за счет уменьшения высоты пазов, уменьшения длины индукционных линий в зубцах и спинках (2-15). С другой стороны, необходимо иметь в виду, что уменьшение длины сердечника или уменьшение его внутреннего диаметра приводит к возрастанию индукции в воздушном зазоре и увеличению магнитного напряжения последнего.

При оптимальном проектировании серии машин улучшение магнитных свойств стали реализуется частично как уменьшение длины сердечника и частично как уменьшение его поперечных размеров.

Удельные потери в стали — потери на единицу массы — задаются при определенных значениях магнитной индукции и частоты перемагничивания. Для марок сталей, идущих на изготовление сердечников асинхронных

двигателей, — это удельные потери $p_{1/50}$ и $p_{1,5/50}$ при индукции в 1 и 1,5 Тл соответственно и частоте перемагничивания 50 Гц.

Зависимость между удельными потерями электротехнической стали и размерами активной части машины при прочих равных условиях может быть определена лишь после проведения ряда расчетов. Следует иметь в виду, что в современных асинхронных машинах потери в стали составляют 1,5—2% потребляемой мощности.

В последние годы в мировой практике для магнитопроводов низковольтных асинхронных двигателей широко применяются холоднокатаные электротехнические стали. Обладая более высокой способностью к намагничиванию и меньшими удельными потерями, они существенно превосходят горячекатаные стали по точности размеров и качеству поверхности. Это позволило повысить коэффициент заполнения сердечника сталью на 2—3%. Более прогрессивная технология производства холоднокатаных сталей обуславливает их меньшую стоимость. В отличие от листовых горячекатаных сталей холоднокатаные электротехнические стали могут выпускаться в лентах нужной ширины, что позволяет автоматизировать процессы штамповки и дает экономию материала за счет уменьшения отходов и применения рационального раскроя.

Классы стали, характеризующиеся структурным состоянием и видом прокатки, объединяют ряд марок, отличающихся степенью легирования стали кремнием. Существует связь между магнитными свойствами стали и степенью легирования: с увеличением степени легирования уменьшаются удельные потери, но в то же время уменьшается способность к намагничиванию, выражаемая характерной точкой кривой $B(H)$, и возрастает стоимость стали. Изменение перечисленных параметров не равнозначно для машин различной мощности. При этом играют роль постоянство относительного значения потерь в стали и уменьшение относительного значения намагничивающего тока с ростом мощности (и размеров) машин. Поэтому для каждой из марок стали, характеризующейся удельными потерями кривой $B(H)$ и стоимостью, существуют рациональные границы применения, определяемые технико-экономическими расчетами.

Применительно к серии асинхронных двигателей общего назначения мощностью до 100 кВт в условиях

СССР использование нелегированной стали ($B_{2500} = 1,65$ Тл, $\rho_{1/50} = 2,5$ Вт/кг) целесообразно для двигателей мощностью до 15—20 кВт. Для машин большей мощности более эффективной является слаболегированная сталь ($B_{2500} = 1,6$ Тл, $\rho_{1/50} = 2,2$ Вт/кг). При этом необходимо учитывать стоимость термообработки, которой должна подвергаться нелегированная сталь после штамповки.

б) Элементы системы изоляции

Под системой изоляции понимается совокупность элементов, изолирующих токоведущие части машины. Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором это корпусная, междуфазовая и витковая изоляции обмотки статора, изоляции внутримашинных соединений и выводных проводов и пропиточный состав.

Главными с точки зрения определения размеров сердечника машины являются корпусная и витковая изоляция, их толщина и нагревостойкость. Существуют и другие не менее важные параметры элементов изоляционной системы, определяющие технологичность и надежность машин. Характеристика этих свойств будет дана в гл. 14.

Толщина изоляции. Толщина витковой и корпусной изоляции влияет прежде всего на коэффициент заполнения паза медью (проводниковым материалом) $k_{п,м}$, который характеризует использование площади паза и представляет собой отношение суммарного сечения всех проводников в пазу к площади паза в штампе $Q_{п}$. Для выпонной обмотки из круглого провода

$$k_{п,м} = \frac{n\pi d^2/4}{Q_{п}}, \quad (2-16)$$

где n — число проводов в пазу; d — диаметр провода без изоляции.

Анализ факторов, влияющих на коэффициент $k_{п,м}$, для трапецидального паза может быть проведен, если представить коэффициент заполнения в виде произведения частичных коэффициентов [9]:

$$k_{п,м} = \frac{\pi}{4} k_1 k_2 k_3; \quad (2-17)$$

здесь k_1 — коэффициент, характеризующий влияние диаметра и толщины изоляции провода $\delta_{и,пр}$ на использование площади паза,

$$k_1 = (d/d')^2 \quad (2-18)$$

(d' — диаметр провода); k_2 — коэффициент, характеризующий влияние на использование площади паза толщины пазовой изоляции $\Delta_{и,п1}$, размеров изоляционных прокладок, зазоров на укладку и припусков на штамповку,

$$k_2 = \frac{Q'_{п}}{Q_{п}} = \frac{1}{1 + \frac{a\Delta_{и,п1}}{\sqrt{Q'_{п}}} + \frac{[(a/2)\Delta_{и,п1}]^2}{Q'_{п}}}, \quad (2-19)$$

($Q'_{п}$ — площадь паза в свету за вычетом площади изоляционных деталей и зазоров на их укладку; $a=8$ — для однослойной обмотки, $a=11$ — для двухслойной обмотки); k_3 — технологический коэффициент, характеризующий влияние неизбежных зазоров между проводами в пазу и неупорядоченность укладки,

$$k_3 = nd'^2/Q'_{п}. \quad (2-20)$$

Обычно этот коэффициент называют коэффициентом заполнения паза. При оптимизационных расчетах максимальное допускаемое значение коэффициента k_3 вводится в исходные данные.

Если представить, что провода в пазу располагаются не случайно, а упорядоченно и между ними существуют зазоры Δ_y , то формула технологического коэффициента заполнения примет вид:

$$k_3 = \frac{nd'^2}{n(d' + \Delta_y)^2} = \frac{1}{(1 + \Delta_y/d')^2}. \quad (2-21)$$

В табл. 2-5 приводятся средние значения коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 и $k_{п,м}$ для асинхронных двигателей серии 4А мощностью до 100 кВт со выпонными обмотками из круглого эмалированного провода.

Очевидно, что повышение коэффициента заполнения паза медью влечет за собой повышение коэффициента использования активной части $k_{и}$, которое может быть реализовано либо как повышение мощности машины, либо как уменьшение ее размеров и массы. Качественные и количественные соотношения в этих зависимостях могут

Таблица 2-5

h, мм	d, мм	δ _и , пр. мм (средняя)	Δ _и , п. мм	Тип обмотки	k ₁	k ₂	k ₃	k _{п, м}
56	0,29—0,33	0,05	0,20	Одно-слойная	0,74	0,85	0,65	0,41
63	0,33—0,44	0,05	0,20	»	0,78	0,86	0,65	0,43
71	0,41—0,59	0,05—0,06	0,25	»	0,81	0,73	0,74	0,44
80	0,49—0,93	0,05—0,07	0,25	»	0,84	0,75	0,73	0,46
90	0,67—1,08	0,06—0,08	0,25	»	0,85	0,75	0,73	0,47
100	0,93—1,30	0,07—0,08	0,25	»	0,87	0,79	0,72	0,49
112	1,04—1,40	0,08	0,30	»	0,88	0,75	0,73	0,48
132	1,04—1,40	0,08	0,30	»	0,88	0,78	0,72	0,49
160	1,16—1,56	0,08	0,40	»	0,89	0,74	0,72	0,47
180	1,16—1,56	0,08	0,40	Одно-двух-слойная	0,89	0,73	0,72	0,465
200	1,20—1,56	0,08	0,40	То же	0,894	0,76	0,72	0,49
225	1,30—1,50	0,08	0,40	Двух-слойная	0,897	0,77	0,73	0,50
50	1,50—1,62	0,08	0,40	»	0,90	0,77	0,73	0,51

быть получены, исходя из следующего. Изменение коэффициента заполнения с $k'_{п,м}$ до $k''_{п,м}$ при неизменном суммарном сечении проводников в пазу влечет за собой соответствующее изменение площади паза в штампе, т. е.

$$k''_{п,м}/k'_{п,м} = Q_{п1}/Q_{п2} = s.$$

Изменение площади паза производится при прямоугольных пазах за счет изменения высоты, а при трапецидальных пазах — и за счет изменения ширины паза у его основания. При этом остаются неизменными все остальные размеры сердечника: внутренний диаметр $D_{и1}$, длина l_1 и высота спинки $h_{а1}$. Такое допущение вполне возможно при небольших пределах изменения $k_{п,м}$, ограниченных реальными возможностями конструкции и параметров материалов. Рассмотрим это на примере трапецидального паза (рис. 2-5). Обозначим

$$(b_1 - b_0)/(b_1 + b_0) = b \text{ и } h'_{з1} - h_{з1} = \Delta h_{з1}.$$

Тогда

$$\Delta h_{з1} = \frac{-(b+1) + \sqrt{(b+1)^2 + 4b(s-1)}}{2b} h'_{з1}. \quad (2-22)$$

Так как

$$D''_{а1} = D'_{а1} + 2\Delta h_{з1}, \text{ то } D''_{а1}/D'_{а1} = 1 + 2\Delta h_{з1}/D'_{а1}.$$

Знак «+» относится к случаю уменьшения коэффициента заполнения, знак «—» к случаю его увеличения.

Изменение заготовительной массы электротехнической стали пропорционально коэффициенту

$$g_c = G''_c/G'_c = (1 \pm 2\Delta h_{з1}/D'_{а1})^2, \quad (2-23)$$

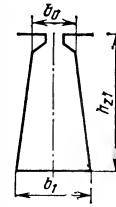


Рис. 2-5.

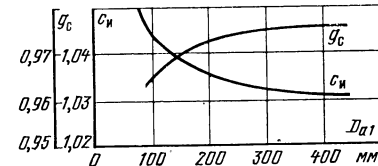


Рис. 2-6.

Рис. 2-5. Трапецидальный паз статора.

Рис. 2-6. Зависимость относительных изменений заготовительной массы электротехнической стали и коэффициента использования от внешнего диаметра сердечника при увеличении коэффициента заполнения паза $k_{п,м}$ на 10%.

а изменение коэффициента использования активной части

$$c_{и} = \frac{k''_{и}}{k'_{и}} = \frac{1}{(1 \pm 2\Delta h_{з1}/D'_{а1})^{2+\alpha}}. \quad (2-24)$$

Анализ (2-23) и (2-24) и проведенные расчеты двигателей мощностью от 0,12 до 90 кВт показывают, что относительное изменение размеров сердечника, вызванное изменением коэффициента $k_{п,м}$, является функцией отношения $h_{з1}/D_{а1}$ и уменьшается с увеличением $D_{а1}$ (рис. 2-6).

Изменение коэффициента заполнения паза медью на 1% приводит к изменению заготовительной массы электротехнической стали на 0,25—0,4% и изменению коэффициента использования активной части на 0,3—0,5%.

Рассмотрим практические пути повышения частных коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 , а следовательно, и коэффициента заполнения паза медью $k_{п,м}$.

Увеличение k_1 может быть достигнуто за счет уменьшения толщины эмалевого покрытия или увеличения диаметра применяемого провода. В связи с широкой механизацией обмоточных работ к качеству эмалевого покрытия провода предъявляются повышенные требования. Уменьшение толщины этого покрытия снизит его механическую прочность и приведет к увеличению числа точечных дефектов, наличие которых связано с технологией эмалирования. Применение проводов увеличенных диаметров также создает затруднения при механизированном втягивании катушек в пазы, поэтому при проектировании следует ориентироваться на указанные в табл. 2-5 значения k_1 .

Увеличение k_2 может быть достигнуто за счет увеличения площади пазов или уменьшения толщины корпусной изоляции. Увеличение площади пазов неосуществимо, так как это связано с уменьшением числа пазов статора, что приведет к ухудшению формы кривой м. д. с. и, следовательно, к увеличению добавочных потерь. Кроме того, уменьшение числа пазов статора связано с увеличением реактивного сопротивления рассеяния, а это приведет к снижению коэффициента мощности, начального пускового, минимального и максимального моментов вращения. Некоторое уменьшение толщины корпусной изоляции по сравнению с применяемой в серии 4А допустимо с точки зрения обеспечения необходимой электрической прочности. Однако при этом должны быть предусмотрены мероприятия по улучшению поверхности паза в собранном сердечнике во избежание проколов изоляции при укладке обмотки. Можно считать реальным уменьшение толщины корпусной изоляции на 25—40%.

Увеличение k_3 может быть достигнуто только за счет упорядочения укладки проводов. Повышение технологического коэффициента заполнения за счет простого уплотнения пучка проводов в пазу приводит, как правило, к отрицательным последствиям — повреждению витковой изоляции и ее последующим пробоям. Так, увеличение технологического коэффициента заполнения k_3 с 0,79 до 0,82 при неупорядоченной укладке привело к повышению аварийности двигателей более чем в 2 раза [10]. Кроме того, увеличение k_3 ведет, как правило, к повышению трудоемкости укладки обмотки. Таким образом, исходя из необходимости повышения надежности

статорных обмоток увеличение k_3 при нерядовой укладке нецелесообразно.

Упорядоченная рядовая укладка проводов может быть получена при открытых пазах статора. Технологический коэффициент заполнения в этом случае достигает значения $k_3=0,9$. Однако применение открытых пазов связано с увеличением пульсаций магнитного потока в воздушном зазоре, что в свою очередь приводит к увеличению добавочных потерь и нагрева машины. Это можно предотвратить, используя магнитные клинья. Однако применение открытых пазов в сочетании с магнитными клиньями для двигателей со всыпной обмоткой в целом неэффективно по следующим причинам:

- 1) при открытых прямоугольных пазах зубцовая зона используется хуже, чем при трапециевидных;
- 2) магнитный клин (клин из магнитодиэлектрика) занимает в пазу значительно больше места, чем крышка-клин, применяемая при всыпных обмотках;
- 3) изготовление формованных (хотя бы в пазовой части) катушек с рядовой укладкой проводов технологически сложнее, чем механизированная укладка (втягивание) катушек в трапециевидные пазы.

Нагревостойкость системы изоляции. В зависимости от предельно допускаемой температуры изоляционные материалы подразделяются на классы нагревостойкости (ГОСТ 8865-70). Класс нагревостойкости системы изоляции — корпусной, витковой, пропиточного состава — определяет допускаемые для обмотки и других частей машины превышения температуры (ГОСТ 183-74).

Значения предельно допускаемой температуры Θ_m изоляционного материала, а также значения предельного длительно допускаемого превышения температуры обмотки статора асинхронных машин $\Delta\Theta_{m1}$, измеренного методом сопротивления, над температурой окружающей среды $+40^\circ\text{C}$ приведены в табл. 2-6. Величина

Таблица 2-6

Класс нагревостойкости изоляции	$\Theta_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta\Theta_{m1}, ^\circ\text{C}$	$(\Theta_m-40)-\Delta\Theta_{m1}, ^\circ\text{C}$
Е	120	75	5
В	130	80	10
Ф	155	100	15
Н	180	125	15

($\Theta_m - 40^\circ\text{C}$) — $\Delta\Theta_{m1}$ представляет собой условную разность максимальной и средней температур обмотки, которая принимается неодинаковой для различных классов нагревостойкости.

Очевидно, что нагревостойкость системы изоляции в значительной степени определяет уровень электромагнитных нагрузок, т. е. степень использования активной части машины.

Если принять линейную зависимость между превышением температуры обмотки статора $\Delta\Theta_{m1}$ и потерями P_{m1} в ней, которая вполне обоснована многочисленными испытаниями,

$$\Delta\Theta_{m1} = \Delta\Theta_{m10} + \alpha P_{m1}, \quad (2-25)$$

то относительное изменение коэффициента использования активной части при увеличении превышения температуры обмотки статора с $\Delta\Theta'_{m1}$ до $\Delta\Theta''_{m1}$ выразится формулой

$$c_n = \sqrt{\frac{\Delta\Theta''_{m1} - \Delta\Theta_{m10}}{\Delta\Theta'_{m1} - \Delta\Theta_{m10}}}, \quad (2-26)$$

где $\Delta\Theta_{m10}$ — превышение температуры обмотки, соответствующее потерям холостого хода.

Однако более высокое использование активных материалов при повышении класса нагревостойкости изоляции приводит к увеличению потерь в обмотках. Поэтому выбор класса нагревостойкости системы изоляции ряда (серии) машин с заранее заданной увязкой мощности с установочными размерами должен проводиться на основании технико-экономических расчетов, учитывающих как стоимость материала (электротехническая сталь, обмоточный провод, изоляционные материалы), так и эксплуатационные затраты, связанные с увеличением потерь активной электроэнергии [6]. При этом существенную роль будет играть степень интенсивной и экстенсивной загрузки машины. Машины для непрерывной эксплуатации с высоким коэффициентом загрузки по мощности не требуют изоляции высокого класса нагревостойкости, так как чрезмерное использование активной части двигателей в этом случае становится невыгодным вследствие возрастания роли стоимости потерь электроэнергии в общей сумме затрат на изготовление и эксплуатацию. В двигателях с высоким пусковым моментом,

где размеры активной части определяются уровнем пусковых характеристик, применение изоляции с высокой нагревостойкостью также нецелесообразно, так как при этом не реализуются ее преимущества.

Разработка и производство бумаг из волокон полиамидов ароматического ряда (номеркс, фенилон и др.) и композиционных материалов класса нагревостойкости F на основе этих бумаг, по стоимости не превышающих материалов класса нагревостойкости В на полиэфирной основе, позволили перевести серии асинхронных двигателей общего назначения с изоляции класса В на изоляцию класса нагревостойкости F [11]. Это в соответствии с (2-26) дает повышение использования активной части машин примерно на 15% и связано с экономией обмоточного провода и электротехнической стали.

Дальнейшее повышение нагревостойкости системы изоляционных материалов до класса Н в асинхронных двигателях хотя и дает повышение использования машин примерно на 14%, но связано с рядом затруднений как эксплуатационного, так и производственного характера. Возникает необходимость в специальных оболочках, так как при повышении температуры активных частей до 160—170°C температура оболочки машины достигает не безопасных для прикосновения значений. При этом также возрастает температура подшипников, что приводит к необходимости применения более дорогой смазки. Высокая температура оболочки повышает стоимость и усложняет технологию нанесения и сушки защитных покрытий, которые в этом случае должны быть более нагревостойкими. Все эти факторы делают перспективным использование изоляционных материалов класса нагревостойкости Н в асинхронных двигателях общего назначения.

в) Обмоточные провода

При проектировании асинхронных двигателей исходными данными являются допускаемые размеры провода, толщина и свойства изоляционного покрытия и удельная электропроводность материала провода.

В асинхронных двигателях общего назначения на напряжение до 1000 В применяются провода с эмалевой изоляцией. Двигатели мощностью до 100 кВт имеют обмотки из круглого провода диаметром от 0,29 до 1,62 мм

с двусторонней толщиной эмаливого покрытия 0,05—0,11 мм, а в двигателях мощностью свыше 100 кВт используются провода прямоугольного сечения с двусторонней толщиной эмаливого покрытия до 0,15 мм.

Класс нагревостойкости эмаливой изоляции может быть В или F. Имеются эмаль-провода с изоляцией класса нагревостойкости H, однако они применяются только в особых случаях. Для двигателей, обмотки которых укладываются механизированным способом, следует применять специальные провода, обладающие повышенной механической прочностью эмаливого покрытия. Более подробные сведения о параметрах, составе и свойствах изоляции проводов содержатся в гл. 14.

Всыпные статорные обмотки асинхронных двигателей могут изготавливаться из медных или алюминиевых проводов. Так как алюминий имеет в 1,63 раза меньшую удельную электрическую проводимость, чем медь, то применение алюминиевых проводов неизбежно связано с необходимостью некоторого увеличения размеров машин.

В начале 60-х годов были предприняты попытки создания серии асинхронных двигателей АО2 с алюминиевыми обмотками. Эти машины по всем размерам активных частей, за исключением длин сердечников, были унифицированы с двигателями, имеющими медные обмотки. Вследствие малой (для алюминиевой обмотки) площади пазов длины сердечников двигателей с алюминиевой обмоткой были увеличены на 30%, в такой же степени возрос и расход электротехнической стали. Коэффициент полезного действия двигателей с алюминиевыми обмотками оказался на 1,2—2,5% ниже.

При изготовлении обмоток из алюминиевого провода по технологии и на оборудовании, предназначенном для изготовления медных обмоток, возникли существенные затруднения, связанные с вытяжкой провода при намотке катушек и плохой пайкой. В эксплуатации такие двигатели оказались менее надежными, чем двигатели с медной обмоткой. В связи с этим двигатели с обмоткой из алюминиевого провода были признаны экономически невыгодными и в настоящее время в СССР не выпускаются.

Однако в условиях дефицита меди, когда в действие вступают не только стоимостные соображения, возникает необходимость производства двигателей с обмотками

из алюминиевого провода. Некоторые европейские фирмы уже в настоящее время переходят на производство таких машин [13].

Необходимо подчеркнуть, что проектирование двигателей с обмотками из алюминиевого провода целесообразно проводить вне связи с размерами существующих машин с обмотками из медного провода, отказавшись в известной мере от их унификации. При этом более экономичные двигатели могут быть получены, если исходить из необходимости увеличения площади паза статора пропорционально отношению удельного сопротивления алюминия и меди, т. е. в 1,6—1,7 раза. Такое увеличение площади пазов может быть получено за счет увеличения их высоты, а при трапецеидальных пазах — и ширины при соответствующем увеличении внешнего диаметра сердечника D_{a1} .

Расчеты, проведенные по (2-22) и (2-23) для серии двигателей, показывают, что высоту паза придется увеличить в среднем в 1,57 раза. Увеличение внешних диаметров составит около 10%, расход электротехнической стали возрастет примерно на 20%, но зато масса обмоточных проводов уменьшится на 50%.

В связи с увеличением высоты паза возрастет магнитное напряжение зубцов и ярма, увеличится и реактивное сопротивление рассеяния, что приведет к некоторому снижению коэффициента мощности, начального пускового и максимального моментов и пускового тока. Несколько снизится и к. п. д. двигателей.

Очевидно, что высказанные соображения не определяют окончательно пути проектирования двигателей с обмоткой из алюминиевого провода, они только показывают возможность получения машин более экономичных, чем это ранее представлялось. Очевидно также, что аппарат оптимального проектирования позволит решить задачу создания двигателей с алюминиевыми обмотками при наименьшем увеличении народнохозяйственных затрат. Следует отметить, что наименьший ущерб при применении алюминия вместо меди будет иметь место в сравнительно малых двигателях, работающих с невысоким коэффициентом загрузки и малой годовой наработкой [14]. Наряду с проектированием обмоток из алюминиевых проводов должна быть разработана технология их производства с учетом специфических свойств алюминия. Таким путем могут быть получе-

ны двигатели с достаточно высокой эксплуатационной надежностью.

2-3. ВНЕШНИЙ ДИАМЕТР СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА

При проектировании серии машин с заранее установленной увязкой шкалы мощностей и шкалы установочных размеров внешний диаметр сердечника статора является основным размером, определяющим при заданной мощности главные размеры активной части — длину и внутренний диаметр сердечника. Выбор того или иного внешнего диаметра сердечника обуславливает изменение расхода электротехнической стали, обмоточного провода массы конструктивных элементов и условий охлаждения машины.

Очевидно, что для каждого типоразмера двигателя, характеризуемого значениями номинальной мощности и частоты вращения, можно определить оптимальное значение внешнего диаметра сердечника статора, соответствующее минимальным производственным и эксплуатационным затратам. Однако при проектировании серии машин такой подход к выбору диаметров не рационален. В этих случаях диаметр сердечника статора двигателей, имеющих одинаковую высоту оси вращения, выбирают в диапазоне оптимальных значений, полученных при поисковых расчетах этих машин.

При применении горячекатаной листовой электротехнической стали для магнитопровода машины внешний диаметр ее сердечника определялся главным образом из соображений оптимального раскроя стандартных листов с учетом технологических припусков, характерных для принятой технологии штамповки — однорядной или многорядной. Применение холоднокатаной рулонной электротехнической стали в современных сериях асинхронных машин сняло эти ограничения. Это дало возможность выбирать внешний диаметр сердечника статора с более обоснованным учетом указанных выше факторов.

Прежде чем перейти к рассмотрению этого вопроса, определим на примере асинхронного короткозамкнутого двигателя со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (см. рис. 15-1) возможные из конструктивных соображений пределы изменения внешнего диаметра сердечника статора при заданных высоте оси вращения и номинальной мощности.

Внешний диаметр сердечника статора D_{a1} и высота оси вращения двигателя h связаны зависимостью:

$$D_{a1} = 2(h - h_{пр}), \quad (2-27)$$

где $h_{пр}$ — просвет — расстояние от нижней кромки сердечника до опорной поверхности лап.

Относительное значение просвета

$$h_{пр*} = h_{пр}/h = 1 - D_{a1}/2h.$$

Из рис. 15-1 видно, что просвет складывается из толщины замков станины и щита, высоты ребер станины h_p , зазора между ребрами станины и направляющим кожухом вентилятора, толщины кожуха вентилятора и зазора между направляющим кожухом вентилятора и опорной поверхностью лап. Минимальный просвет будет при отсутствии оребрения в нижней части станины, т. е. при $h_p = 0$, а максимальный — при полном круговом оребрении. Обычно высота ребер $h_p \approx 0,1 D_{a1}$, а сумма всех остальных размеров не превышает $0,05 D_{a1}$. Подставив эти значения в (2-27), получим следующие пределы изменения D_{a1} и $h_{пр}$:

$$\left. \begin{aligned} 1,5h &\leq D_{a1} \leq 1,8h; \\ 0,1 &\leq h_{пр*} \leq 0,25. \end{aligned} \right\} \quad (2-28)$$

Таким образом, возможное из конструктивных соображений изменение внешнего диаметра сердечника статора составляет 20%.

Рассмотрим влияние изменения D_{a1} в этих пределах на другие размеры машины.

Связь между внешним диаметром сердечника статора и его длиной. Зависимость между подводимой мощностью P_1 , внешним диаметром сердечника статора D'_{a1} и его длиной l_1 определяется выражением (2-8), по которому можно предварительно найти длину сердечника статора при том или ином значении его внешнего диаметра.

Величина α в высокоиспользованных двигателях со степенью защиты IP44 составляет около 0,3, а в двигателях со степенью защиты IP23 достигает 0,8. Таким образом, для асинхронного двигателя со степенью защиты IP44 выбор D_{a1} в пределах согласно (2-28) связан с изменением длины сердечника до 60%.

Это обстоятельство при массовом производстве используется для получения «коротких» машин с наиболь-

шим D_{a1} . При этом уменьшается число вырубков листов сердечника, повышается точность механической обработки, облегчаются операции ручной укладки обмотки.

Связь между внешним диаметром сердечника и длиной витка обмотки статора. Длина витка обмотки статора $l_{w1} = 2(l_1 + l_{n1})$.

Длина любой части ориентировочно может быть определена по формуле

$$l_{n1} = k_n \frac{\pi D_{a1}}{2p} (k_D + k_{hz1}) \beta_y, \quad (2-29)$$

где k_n — коэффициент формы катушки (см. табл. 4-2).

Тогда длина витка обмотки статора

$$l_w = \frac{2P_1}{k_n D_{a1}^{2+\alpha}} + k_h \beta_y \frac{\pi D_{a1}}{p} (k_D + k_{hz1}). \quad (2-30)$$

Зависимость (2-30) имеет экстремум. Критическое значение $D_{a1крw}$, соответствующее минимальной длине витка, равно:

$$D_{a1крw} = \left[\frac{2p}{\pi k_n k_n (k_D + k_{hz1}) \beta_y} \right]^{\frac{1}{3+\alpha}}. \quad (2-31)$$

Расчеты, проведенные по (2-30) и (2-31), показывают, что при изменении D_{a1} в пределах, указанных в (2-28), отклонение длины витка от минимального значения может достигнуть 10%.

Влияние внешнего диаметра сердечника на эффективность охлаждения. При изменении внешнего диаметра сердечника статора изменяется эффективная теплоотдающая поверхность активной части двигателя, а также поверхность оребрения станины. Поскольку влияние указанных факторов на теплопередачу в машине неравнозначно, рассмотрим их отдельно.

Эффективной теплоотдающей поверхностью активной части двигателя со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 является наружная цилиндрическая поверхность сердечника статора, плотно запрессованная в оребренную станину. Теплоотдача от лобовых частей обмотки статора к оребренной оболочке происходит через воздух внутри машины и значительно менее эффективна.

С учетом (2-8) наружная эффективная теплоотдающая поверхность сердечника

$$S_{эф} = \pi \frac{P_1}{k_n D_{a1}^{1+\alpha}}. \quad (2-32)$$

Изменение эффективной теплоотдающей поверхности при изменении D_{a1} в пределах, заданных (2-28), подсчитанное по (2-32), составляет около 30%.

Выше отмечалось влияние просвета $h_{пр}$ на высоту ребер в нижней части корпуса машины. Область этого влияния приближенно определяется углом β , который по рис. 2-3 равен: $\beta = 2 \arctg(b_{10}/2h)$. Так как $b_{10} \approx 1,6 h$, то $\beta = 74^\circ$.

Поверхность охлаждения станины S_o — полная поверхность с учетом оребрения

$$S_o = 2\pi (D_{a1} + 2\Delta_o) L \frac{h_p}{t_p} \left[\left(1 - \frac{\beta}{360^\circ}\right) k_y + \frac{\beta}{360^\circ} \frac{h_{p,п}}{h_p} + \left(\frac{t_p}{h_p} - \frac{b_p}{h_p}\right) \frac{k_y}{2} \right], \quad (2-33)$$

где h_p — полная высота ребра; $h_{p,п}$ — высота ребра в зоне просвета; t_p — шаг оребрения; b_p — толщина ребра у основания; k_y — коэффициент, учитывающий неоребренную поверхность корпуса в зоне выводного устройства и др.; L — длина станины.

Обычно $t_p/h_p = 0,6 \div 0,8$; $b_p/h_p = 0,15 \div 0,2$; $k_y = 0,7 \div 0,9$.

При изменении просвета $h_{пр*} = 0,09 \div 0,25$ для отношения $h_{p,п}/h_p$ будет справедливо:

$$h_{p,п}/h_p = 6,2h_{пр*} - 0,55.$$

Расчеты, проведенные по (2-33) с учетом конкретных значений всех соотношений, показывают, что изменение просвета в пределах (по 2-28) влечет за собой изменение поверхности охлаждения корпуса до 20%.

Зависимость массы оболочки от внешнего диаметра сердечника статора. Оболочку двигателя составляют оребренная станина и два подшипниковых щита. Для упрощения расчетов представим, что станина имеет вид цилиндра с внешним диаметром $D_{a1} + 2\Delta_o$ и внутренним диаметром, равным внешнему диаметру D_{a1} сердечника

статора, а подшипниковый щит имеет вид диска с диаметром D_{a1} и толщиной Δ_0 . Тогда масса оболочки

$$m_0 \approx \pi \Delta_0 \rho_0 (k_p D_{a1} L + 1/2 D_{a1}^2), \quad (2-34)$$

где ρ_0 — плотность материала оболочки; k_p — коэффициент, учитывающий оребрение корпуса.

Для чугунных корпусов $k_p = 1,5 \div 1,6$.

Длина станины

$$L \approx l_1 + 2l_b,$$

где l_b — длина вылета лобовой части обмотки,

$$l_b = k_b \frac{\pi D_{a1}}{2p} \beta_y (k_D + k_{h21}).$$

Подставив l_1 из (2-8), получим:

$$m_0 = \pi \Delta_0 \rho_0 \left\{ \frac{k_p}{k_{и}} \frac{P_1}{D_{a1}^{1+\alpha}} + \left[\frac{\pi}{p} k_p k_b (k_D + k_{h21}) + \frac{1}{2} \right] D_{a1}^2 \right\}. \quad (2-34a)$$

Значение $D_{a1 \text{ кг}}$, соответствующее минимальной массе оболочки:

$$D_{a1 \text{ кг}} = \left[\frac{1+\alpha}{k_{и}} \frac{P_1}{\frac{2\pi}{p} k_b (k_D + k_{h21}) + \frac{1}{k_p}} \right]^{\frac{1}{3+\alpha}}. \quad (2-35)$$

Расчеты, проведенные по (2-34) и (2-35), показывают, что экстремальная масса оболочки соответствует значению D_{a1} , лежащему ниже пределов, заданных выражением (2-28).

При изменении D_{a1} в указанных пределах изменение массы оболочки достигает 15%.

Выбор ряда внешних диаметров. Полученные зависимости дают возможность качественно и количественно оценивать возможные варианты при выборе ряда внешних диаметров для серии короткозамкнутых асинхронных двигателей со степенью защиты IP44. При заданной увязке шкал мощностей и установочных размеров подход к выбору ряда диаметров в известной степени определяется характером увязки. При ненапряженной увязке сравнительно небольшой мощности в заданных высотах оси вращения предпочтительны относительно малые диаметры сердечников. Такой подход обеспечивает эффективное охлаждение за счет полного кругового ореб-

рения корпусов. Подобный ряд с постоянным относительным просветом, близким к максимально целесообразному, может быть получен при соблюдении условия:

$$D_{a1} = 2h (1 - h_{\text{пр}*}). \quad (2-36)$$

Примером такого ряда может служить ряд внешних диаметров сердечников, принятый в серии АО (см. табл. 2-7). Некоторые колебания просвета $h_{\text{пр}}$ объясняются необходимостью раскрытия с минимальными отходами стандартных листов электротехнической стали.

Тенденции к уменьшению материалоемкости машин и повышению их компактности выдвигают более напряженную увязку рядов мощности и установочных размеров — повышение мощности в заданных высотах оси вращения. Выбор малых диаметров при этом приводит к существенному увеличению длин сердечников, что делает машины менее технологичными в условиях массового производства. В этих условиях предпочтительны большие диаметры.

Кроме технологических соображений, при выборе внешних диаметров сердечников статора серии двигателей следует также учитывать существование различных условий охлаждения малых и больших машин. В малых машинах со сравнительно небольшими радиальными размерами и вследствие этого малым перепадом температуры между обмоткой и поверхностью оболочки эффективность охлаждения определяется главным образом теплоотдачей оребренной оболочки (способ охлаждения IC0141). Увеличение диаметра и связанное с этим уменьшение эффективной поверхности охлаждения отрицательно сказывается на тепловом состоянии машины.

С увеличением радиальных размеров машины и ростом расстояний между тепловыделяющими и теплоотдающими элементами все большую роль играет внутренняя теплопередача, а роль наружного оребрения несколько уменьшается. В таких машинах принимаются меры для уменьшения внутренних перепадов температур (внутренняя циркуляция, дополнительное охлаждение ротора и т.д.); при этом могут быть приняты относительно большие диаметры сердечников за счет уменьшения относительной высоты ребер.

Таким образом, для ряда высокоиспользованных двигателей целесообразен ряд внешних диаметров, обеспечивающий линейное уменьшение просвета с увеличением

высоты оси вращения. Это видно на примере двигателей серии 4А и разрабатываемой в настоящее время странами — членами СЭВ перспективной унифицированной серии АІ (табл. 2-7).

Кроме того, даже при соблюдении условия (2-28) с помощью (2-36) может быть получено множество рядов внешних диаметров сердечника. Каждый из этих рядов может быть исходным для проведения поисковых оптимизационных расчетов, определяющих другие размеры активной части машин. Выбор того или иного ряда внешних диаметров сердечников следует производить, исходя из конкретных задач, поставленных при проектировании серии наряду с общей задачей получения оптимальных двигателей. Одной из таких задач является повышение технологичности машин. Наиболее технологичными, как уже упоминалось выше, являются «короткие» машины, имеющие большие значения D_{a1} , ограниченные условием (2-28).

Для двигателей серии 4А с внешними диаметрами сердечников по табл. 2-7 отношение l_1/D_{a1} в среднем составляет 0,6. В [8] показано, что минимум стоимости имеют двигатели с $l_1/D_{a1}=0,8$. Исследованиями [6] ус-

тановлено, что суммарные затраты в рассматриваемом диапазоне D_{a1} изменяются по закону, близкому к параболе. Увеличение приведенных затрат может быть определено по формуле:

$$\Delta Z_T = 2 (\Delta D_{a1})^2, \quad (2-37)$$

где ΔD_{a1} — отклонение внешнего диаметра сердечника от оптимального значения (в долях оптимального значения); ΔZ_T — увеличение суммарных затрат за нормативный срок окупаемости относительно оптимального значения (в долях оптимального значения).

Используя (2-8) и (2-37), нетрудно убедиться, что суммарные затраты для двигателей с $l_1/D_{a1}=0,6$ будут выше суммарных затрат при $l_1/D_{a1}=0,8$ всего на 2—3%.

Для серий двигателей с пониженным уровнем шума, например серии АІ, уровень шума двигателей которой должен быть ниже уровня шума двигателей серии 4А, целесообразно уменьшение диаметров сердечников статора.

В известной мере на выбор внешних диаметров статора оказывает влияние принятая в той или иной серии степень унификации асинхронных двигателей закрытого и защищенного исполнений и соотношения объемов их выпуска.

Для двигателей со степенью защиты IP23 (22) с точки зрения эффективности охлаждения как при радиальной, так и при аксиальной системе вентиляции предпочтительными являются «короткие машины», имеющие максимальные внешние диаметры сердечников.

При проектировании участка серии, включающего в себя как двигатели со степенью защиты IP44, так и двигатели со степенью защиты IP23 (22), целесообразно сопоставить два варианта:

1) двигатели обоих исполнений по степени защиты имеют одинаковые внешние диаметры сердечников. При этом значение D_{a1} принимается максимальным с учетом условий (2-28) и (2-36). Такое решение принято в серии 4А;

2) двигатели имеют различные внешние диаметры сердечников — оптимальные для каждого из исполнений. При этом из технологических соображений целесообразно, чтобы внешний диаметр сердечника статора двигателя со степенью защиты IP23 (22) соответствовал внешнему диаметру сердечника двигателя со степенью защиты IP44 следующей высоты оси вращения.

Таблица 2-7

h , мм	Серия АО		Серия АО2		Серия 4А		Серия АІ	
	D_{a1} , мм	$h_{пр*}$	D_{a1} , мм	$h_{пр*}$	D_{a1} , мм	$h_{пр*}$	D_{a1} , мм	$h_{пр*}$
56	—	—	—	—	89	0,205	89	0,205
63	—	—	—	—	100	0,201	100	0,201
71	—	—	—	—	116	0,183	114	0,197
80	—	—	—	—	131	0,182	126	0,213
90	—	—	133	0,262	149	0,172	145	0,195
100	145	0,275	153	0,235	168	0,16	163	0,185
112	—	—	180	0,196	191	0,139	184	0,179
125	182	0,272	—	—	—	—	—	—
132	—	—	208	0,212	225	0,148	215	0,185
160	—	—	243	0,24	272	0,150	260	0,188
170	245	0,28	—	—	—	—	—	—
180	—	—	291	0,192	313	0,136	295	0,181
200	327	0,182	343	0,143	349	0,128	327	0,183
225	—	—	—	—	392	0,129	368	0,182
236	368	0,22	—	—	—	—	—	—
250	—	—	393	0,214	437	0,124	420	0,160
280	423	0,245	458	0,182	520	0,07	480	0,140
335	493	0,264	—	—	—	—	—	—

2-4. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР МЕЖДУ СТАТОРОМ И РОТОРОМ

Воздушный зазор между статором и ротором играет важную роль в рабочих процессах асинхронного двигателя. При выборе зазора сталкиваемся с противоречивыми тенденциями. При малом воздушном зазоре требуется небольшая м. д. с., вследствие чего уменьшается ток холостого хода и увеличивается коэффициент мощности. С другой стороны, при уменьшении воздушного зазора увеличиваются амплитуды высших гармонических магнитного поля в воздушном зазоре, что приводит в свою очередь к увеличению добавочных потерь, добавочных моментов и увеличению магнитного шума машины. В современных условиях при все возрастающих требованиях к пусковым и шумовым характеристикам машин, с одной стороны, и повышению использования активных частей — с другой, предпочтительными являются большие воздушные зазоры.

Относительно невысокая стоимость компенсации реактивной мощности с помощью статических конденсаторов делает допустимым некоторое снижение коэффициента мощности, связанное с увеличением воздушного зазора. Определение воздушного зазора с учетом перечисленных факторов чрезвычайно сложно. Поэтому расчет воздушного зазора проводится по эмпирическим формулам, учитывающим как основные соотношения машины, так и опыт производства и эксплуатации проверенных конструкций.

Воздушный зазор δ может быть представлен как сумма двух составляющих:

$$\delta = \delta_0 + \delta_p, \quad (2-38)$$

где δ_0 — составляющая воздушного зазора, компенсирующая его изменение в процессе работы машины, мм; δ_p — составляющая воздушного зазора, зависящая от параметров машины — номинальной мощности P_2 , кВт, и числа пар полюсов, мм,

$$\delta_p = k_p \sqrt[3]{P_2}. \quad (2-39)$$

Коэффициент k_p в зависимости от числа пар полюсов принимает следующие значения:

$$\begin{array}{rcccl} p & \dots & 1 & 2 & 3 \\ k_p & \dots & 0,16 & 0,125 & 0,09, \end{array}$$

Изменение воздушного зазора в процессе работы машины может иметь место вследствие теплового расширения $\Delta\delta_t$, прогиба вала $\Delta\delta_f$ и эксцентриситета $\Delta\delta_e$, т. е.

$$\delta_0 = \Delta\delta_t + \Delta\delta_f + \Delta\delta_e.$$

Изменение воздушного зазора вследствие теплового расширения

$$\Delta\delta_t = 1/2 \alpha_t D_{i1} \Theta_2 (1 - \Theta_{a1}/\Theta_2), \quad (2-40)$$

где α_t — температурный коэффициент линейного расширения электротехнической стали, $1/^\circ\text{C}$; Θ_2 — температура ротора, $^\circ\text{C}$; Θ_{a1} — температура спинки сердечника статора в зоне контакта ее со станиной, $^\circ\text{C}$.

Отношение Θ_{a1}/Θ_2 при прочих равных условиях зависит от $1 - D_{i1}/D_{a1}$. Средние значения Θ_{a1} и Θ_2 , приведенные в табл. (2-8), получены расчетным путем для двигателей серии 4А со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141.

Таблица 2-8

Число пар полю- сов, <i>p</i>	$\Theta_{a1}, ^\circ\text{C}$			$\Theta_2, ^\circ\text{C}$		
	при классе нагревостойкости изоляции					
	Е	В	Г	Е	В	Г
1	70	80	100	174	200	250
2	70	80	100	145	165	210
3	70	80	100	135	155	195

Уменьшение воздушного зазора от прогиба вала определяется допустимым прогибом:

$$\Delta\delta_f = k_f \delta. \quad (2-41)$$

По нормам механических расчетов $k_f = f/\delta \leq 0,1$.

Уменьшение воздушного зазора от эксцентриситета ротора относительно статора

$$\Delta\delta_e = (\delta_{\max} - \delta_{\min})/2 = k_e \delta. \quad (2-42)$$

Коэффициент k_e определяется допустимой неравномерностью воздушного зазора. С точки зрения параметров двигателя — магнитного шума, добавочных потерь, нагрева и др. — неравномерность воздушного зазора двигателей общего назначения мощностью до 100 кВт не должна превышать 30%. Получение меньшей неравномерности в условиях массового производства связано с существенным усложнением технологии. Так, чтобы

достигнуть неравномерности воздушного зазора не более 10%, требуется механическая обработка внутренней поверхности сердечника статора. При допустимой неравномерности воздушного зазора 30% $k_e = 0,15$.

Подставив значения составляющих в выражение для δ , получим:

$$\delta = \frac{0,5\alpha D_{i1} \Theta_2 (1 - \Theta_{a1}/\Theta_2) + k_p \sqrt[3]{P_2}}{1 - (k_f + k_e)} \quad (2-43)$$

Таблица 2-9

h, мм	δ , мм			
	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8
56	0,25 (0,17)	0,25 (0,13)	—	—
63	0,30 (0,22)	0,25 (0,16)	0,25 (0,10)	—
71	0,35 (0,28)	0,25 (0,20)	0,25 (0,15)	0,25
80	0,35 (0,35)	0,25 (0,24)	0,25 (0,18)	0,25
90	0,40 (0,39)	0,25 (0,28)	0,25 (0,29)	0,25
100	0,45 (0,46)	0,30 (0,33)	0,30 (0,24)	0,30
112	0,50 (0,52)	0,30 (0,38)	0,30 (0,29)	0,30
132	0,60 (0,60)	0,35 (0,47)	0,35 (0,34)	0,35
160	0,80 (0,75)	0,50 (0,6)	0,40 (0,44)	0,40
180	0,90 (0,87)	0,60 (0,7)	0,45 (0,48)	0,45
200	1,0 (0,99)	0,70 (0,8)	0,50 (0,56)	0,50
225	1,1 (1,06)	0,85 (0,86)	0,60 (0,61)	0,60
250	1,2 (1,24)	1,0 (0,99)	0,70 (0,69)	0,70

Наименьший воздушный зазор, который могут обеспечить технология и оборудование, применяемые при производстве электродвигателей, $\delta_{min} = 0,25$ мм.

В табл. 2-9 приведены значения воздушных зазоров, принятые для двигателей серии 4А со степенью защиты IP44, способом охлаждения IC0141, мощностью до 100 кВт. В скобках даны значения зазоров, полученных по (2-43).

2-5. ЧИСЛО ПАЗОВ СТАТОРА И РОТОРА

Число пазов статора $z_1 = 2mpq$. Число пар полюсов p и число фаз m определяются заданием, и варьировать можно только число пазов на полюс и фазу q . В асинхронных двигателях на напряжение до 1000 В принимают $q = 1 \div 8$. В редких случаях при большом числе полюсов $q = 0,5$. Так как ширину зубца конструктивно и технологически нельзя выполнить меньше определенного

значения, то, естественно, при большем числе полюсов и меньшем внутреннем диаметре статора принимают меньшие значения q . Влияние q на параметры и экономичность двигателей неоднозначно.

Рассмотрим основные зависимости, связанные с выбором числа пазов на полюс и фазу.

1. Реактивное сопротивление короткого замыкания асинхронного двигателя x_k можно выразить как

$$x_k = \frac{k_1}{z_1} (\lambda_{n1} + \lambda_{s1} + \lambda_{z1}) + \frac{k_2}{z_2} (\lambda_{n2} + \lambda_{s2} + \lambda_{z2}), \quad (2-44)$$

где k_1 и k_2 — постоянные; λ_{n1} и λ_{n2} , λ_{s1} и λ_{s2} , λ_{z1} и λ_{z2} — магнитные проводимости, соответствующие потокам пазового, лобового и дифференциального рассеяний статора и ротора.

Магнитные проводимости паза и лобовых частей обмоток пропорциональны числу пазов статора или ротора соответственно, т. е.

$$\lambda_{n1(2)} = k_{n1(2)} z_{1(2)}; \quad \lambda_{s1(2)} = k_{s1(2)} z_{1(2)}.$$

Магнитная проводимость дифференциального рассеяния обратно пропорциональна числу пазов статора или ротора, т. е.

$$\lambda_{z1(2)} = k_{z1(2)} / z_{1(2)}.$$

С учетом этого после некоторых преобразований выражение (2-44) примет вид:

$$x_k = A + \frac{1}{z_1^2} \left[k_1 k_{z1} + k_2 k_{z2} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2 \right], \quad (2-44a)$$

где $A = k_1 (k_{n1} + k_{s1}) + k_2 (k_{n2} + k_{s2})$ — составляющая реактивного сопротивления, не зависящая от числа пазов.

Таким образом, при увеличении числа пазов статора составляющая реактивного сопротивления, соответствующая потокам дифференциального рассеяния, уменьшается довольно быстро. Однако полное реактивное сопротивление короткого замыкания x_k при этом уменьшается гораздо медленнее, ибо указанная составляющая обычно не превышает 20—30%. Расчеты показывают, что реактивное сопротивление x_k изменяется примерно обратно пропорционально сумме числа пазов статора и ротора. С уменьшением реактивного сопротивления возрастают максимальный и начальный пусковой моменты, начальный пусковой ток, а также коэффициент

мощности двигателя. В табл. 2-10 приведены данные расчета двух двигателей, подтверждающие выдвинутые выше положения.

Таблица 2-10

z_1/z_2	x_k , Ом	$\cos \varphi$	$M_{II}/M_{НОМ}$	$M_{RP}/M_{НОМ}$	$I_{II}/I_{НОМ}$
$P_2=15$ кВт; $n_c=1000$ об/мин					
54/42	2,07	0,869	0,92	2,01	4,30
54/50	1,88	0,878	1,03	2,15	4,60
72/56	1,56	0,882	1,26	2,40	5,10
$P_2=55$ кВт; $n_c=1500$ об/мин					
36/28	0,66	0,888	0,96	2,48	5,35
48/38	0,47	0,917	1,29	3,04	6,36
60/50	0,39	0,927	1,54	3,39	7,08

2. С увеличением числа пазов на полюс и фазу форма кривой м. д. с. становится близкой к синусоидальной, что приводит к снижению добавочных потерь в двигателе.

При выполнении обмоток с соответствующим укорочением удастся существенно снизить обмоточные коэффициенты всех высших гармоник м. д. с., кроме зубцовых. Практически это возможно при любом значении q , кроме $q=1$. Порядок зубцовых гармоник

$$v_z = 2qmk + 1,$$

где k — любое целое положительное или отрицательное число.

Так как амплитуда высшей гармоники обратно пропорциональна ее порядку, то очевидно, что увеличение q способствует снижению амплитуды зубцовых гармоник, что благоприятно сказывается на свойствах двигателей.

3. При увеличении числа пазов статора увеличивает поверхность охлаждения пазовых и лобовых частей обмотки, что способствует снижению ее нагрева.

4. Увеличение числа пазов статора приводит к уменьшению коэффициента заполнения пазов медью вследствие увеличения относительной площади паза, занимаемой изоляцией, что приводит в свою очередь к увеличению расхода электротехнической стали. При этом, естественно, возрастает расход изоляционных материалов.

5. Увеличение числа пазов статора усложняет изгото-

вление двигателя и удорожает его, так как усложняются статорные штампы, а стойкость их уменьшается, увеличиваются трудозатраты на операциях, связанных с изолировкой пазов и укладкой обмотки. Последние

Таблица 2-11

q	Диапазон высот оси вращения при q						
	1,5	2	2,5	3	4	5	6
1,5	—	—	—	—	56—132	—	160—250
2	—	56—80	—	80—160	160—250	250—355	—
2,5	—	63—112	—	112—160	160—355	—	—
3	—	—	—	160—355	—	—	—
4	—	—	—	280—355	—	—	—
5	—	—	315—355	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—

обстоятельства играют очень важную роль в условиях крупносерийного или массового производства.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что при конкретном проектировании следует ограничиться необходимым минимумом числа пазов статора, требующимся для достижения достаточно хороших характеристик двигателей.

В табл. 2-11 приводятся значения q , рекомендуемые для двигателей мощностью до 400 кВт.

Число пазов ротора в той же степени, что и число пазов статора, влияет на реактивное сопротивление двигателя (см. табл. 2-10). Однако это обстоятельство не является решающим. Главным является оценка соотношения числа пазов статора и ротора, оказывающего влияние на рабочие, пусковые и виброшумовые характеристики двигателей. Это касается в основном добавочных потерь, добавочных асинхронных и синхронных моментов и радиальных сил, вызывающих шумы и вибрации.

Вопросу влияния соотношения числа пазов статора и ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя на указанные характеристики посвящены многочисленные исследования, например [15, 16], поэтому ограничимся наиболее общими рекомендациями применительно к асинхронным двигателям мощностью до 100 кВт с короткозамкнутым ротором, залитым алюминием, и полузакрытыми пазами статора.

1. В этих машинах основную часть добавочных потерь составляют потери от зубцовых гармоник поля статора в сердечнике и клетке ротора. Пульсационные потери в

зубцах ротора, потери в обмотке и изоляции клетки ротора (от поперечных токов), вызванные первыми зубцовыми гармониками статора, пропорциональны k_{vz}^2 :

$$k_{vz}^2 = \frac{\sin\left(\pi \frac{z_1}{z_2}\right)^2}{\left(\pi \frac{z_1}{z_2}\right)^2}.$$

Отсюда можно заключить, что при существенном от-
личии числа пазов ротора от числа пазов статора доба-
вочные потери возрастают. Особенно это проявляется в
двигателях со скосом пазов и неизолированной клеткой
ротора, где существенно увеличиваются потери от по-
перечных токов между клеткой и сердечником.

Следовательно, с точки зрения снижения добавочных
потерь число пазов ротора должно быть близким числу
пазов статора. Общепринято придерживаться соотно-
шения

$$0,8z_1 < z_2 < 1,25z_1. \quad (2-45)$$

2. Для уменьшения добавочных асинхронных момен-
тов, вызванных зубцовыми гармониками м. д. с. статора
и гармониками проводимости воздушного зазора, число
пазов ротора должно удовлетворять условию

$$z_2 \leq 1,25z_1. \quad (2-46)$$

Целесообразно, чтобы число пазов ротора было
меньше числа пазов статора, т. е.

$$z_2 < z_1.$$

3. Синхронные моменты не появляются в начальный
момент пуска ($n=0$), если

$$\left. \begin{aligned} k_2 z_2 &\neq k_1 z_1; \\ z_2 &\neq 6pk, \end{aligned} \right\} \quad (2-47)$$

где k, k_1, k_2 — любые положительные целые числа.

Для устранения синхронных моментов в двигательном
(+) и тормозном (—) режимах должны соблюдаться
условия

$$\left. \begin{aligned} k_2 z_2 &\neq k_1 z_1 \pm 2p; \\ z_2 &\neq (6k \pm 2)p. \end{aligned} \right\} \quad (2-48)$$

Синхронные моменты от зубцовых гармоник могут
быть существенно уменьшены применением скоса пазов
на одно-полтора зубцовых деления. Однако следует

иметь в виду, что применение скоса пазов при неизоли-
рованной клетке ротора связано с ростом добавочных
потерь. В связи с этим применение скоса пазов при
 $z_2 > z_1$ нежелательно.

Синхронные моменты от незубцовых гармоник могут
быть снижены путем выбора соответствующего укороче-
ния шага обмотки статора.

4. Вибрационные моменты не возникают, если выпол-
няется условие

$$\left. \begin{aligned} z_2 &\neq z_1 \pm 1; \\ z_2 &\neq z_1 \pm 2p \pm 1. \end{aligned} \right\} \quad (2-49)$$

5. Для уменьшения шума и вибрации магнитного
происхождения соотношения чисел пазов статора и ро-
тора должны соответствовать рекомендациям, изложен-
ным в гл. 12.

Очевидно, не всегда удастся выбрать число пазов
ротора, удовлетворяющее всем условиям. Это относит-
ся в первую очередь к машинам малой мощности, име-
ющим небольшое число пазов статора. В таких двигате-
лях, как правило, применяется скос пазов. В двигате-
лях большей мощности ($h \geq 160$ мм) удастся избежать
скоса пазов, получив при этом удовлетворительные ха-
рактеристики.

В табл. 2-12 даны рекомендации по выбору соотно-
шений чисел пазов статора и ротора.

Таблица 2-12

$2p$	z_1	z_2			
2	24	18'	20'	[28']	
	36	28	30'		
	48	38'	40	[56]	[58]
4	24	18'	22'	[30']	
	36	26'	28'	30'	
	48	(38)	38'	41	34'
	60	50	56'	[70]	[58]
6	36	28'	33'	[42']	
	54	42'	(44)	50'	
	72	56	58'	[82]	[86]
					51'
8	36	28'			[64]
	48	44	50	[62]	
	72	56	58'	[86]	[90]
					[88]

Таблица 2-13

h, мм	z ₁ /z ₂				h, мм	z ₁ /z ₂			
	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8		2p=2	2p=4	2p=6	2p=8
56	24/18	24/18			160	36/28	48/41	54/51	48/44
63	24/18	24/18	36/28		180	36/28	48/38	72/56	72/56
71	24/20	24/18	36/28	36/28	200	36/28	48/38	72/56	72/56
80	24/20	36/28	36/28	36/28	225	36/28	48/38	72/56	72/56
90	24/20	36/28	36/28	36/28	250	48/40	60/50	72/56	72/56
100	24/20	36/28	36/28	36/28	280	48/38	60/50	72/82	72/86
112	24/20	36/34	54/51	48/44	315	48/38	60/50	72/82	72/86
132	24/20	36/34	54/51	48/44	355	48/38	60/50	72/82	72/86

Число пазов, обозначенное цифрой со штрихом, следует применять в двигателях со скосом не менее чем на одно зубцовое деление, число пазов в круглых скобках — при двухслойной обмотке с укорочением, число пазов в квадратных скобках — при изолированной клетке ротора.

В табл. 2-13 приведены значения чисел пазов статора и ротора, принятые в серии 4А.

2-6. ФОРМА ПАЗОВ СТАТОРА И РОТОРА

Пазы статора асинхронных двигателей классифицируются по форме на прямоугольные и трапециевидные, а по степени открытия — на открытые, полуоткрытые и полужакрытые. Прямоугольные открытые и полуоткрытые пазы применяются для жестких статорных обмоток из прямоугольного провода в двигателях мощностью свыше 100 кВт или в специальных двигателях. Для асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В мощностью до 100 кВт со всыпными статорными обмотками из круглого провода наиболее эффективны трапециевидные полужакрытые пазы, обеспечивающие постоянство ширины зубца статора по высоте, т. е. лучшее использование зубцовой зоны магнитопровода. Сравнительно небольшое открытие паза снижает по сравнению с открытым и полуоткрытым пазами пульсации магнитного потока в воздушном зазоре.

Наиболее распространенные виды трапециевидных пазов показаны на рис. 5-6. Применение того или иного вида пазов обусловлено чисто технологическими соображениями. Трапециевидные пазы с прямым дном (см. рис. 5-6, б, в) предпочтительны при механизирован-

ной укладке обмотки. Овально-трапециевидные пазы (рис. 5-6, а) обеспечивают большую стойкость штампов и могут применяться при раздельной механизированной или ручной укладке. Трапециевидный паз с трапециевидной клиновой частью (рис. 5-6, в) позволяет более эффективно применять профильное шлифование при изготовлении штампов.

Основные размеры паза — высота и ширина — при проектировании асинхронных двигателей с применением ЭВМ определяются оптимизационным расчетом. Размеры открытия определяются главным образом из технологических соображений. Минимальная ширина открытия b_s выбирается в зависимости от диаметра провода d' . При механизированной укладке должно соблюдаться условие

$$d'/b_{s1} \leq 0,4. \quad (2-50)$$

Высота шлица h_s равна обычно 0,5 мм для двигателей с $h < 160$ мм и 1 мм для двигателей с $h > 160$ мм. Для двигателей общего назначения с полуоткрытыми пазами статора $h_s = 1,1$ мм.

В короткозамкнутых роторах асинхронных двигателей с литой алюминиевой клеткой применяются полузакрытые или закрытые пазы. Форма пазов ротора выбирается в зависимости от требований к пусковым характеристикам машины. Как и для пазов статора, для пазов ротора наиболее рациональными являются трапециевидные овальные пазы (см. рис. 5-8, б, в, д).

Если высота паза ротора не превышает глубины проникновения электромагнитной волны в проводящую среду стержня при $f_2 = 50$ Гц ($s=1$, для алюминия эта высота составляет около 15 мм), то параметры обмотки ротора (активное и индуктивное сопротивление) считаются практически неизменными при изменении частоты тока ротора f_2 в процессе пуска. Роторы, высота пазов которых превышает 15 мм, называются роторами с глубоким пазом. Вследствие вытеснения тока в стержнях параметры обмотки ротора изменяются в процессе пуска по известным законам. Такое разделение роторов по изменению параметров обмотки при пуске является в известной степени условным, так как реактивное сопротивление рассеяния изменяется вследствие насыщения в обеих категориях роторов.

Для определения области применения роторов с постоянными и переменными параметрами воспользуемся выражением, связывающим кратность начального пускового момента, кратность начального пускового тока и скольжения в номинальном режиме $S_{\text{ном}}$ с активным сопротивлением ротора:

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}} = \left(\frac{I_{1\text{п}}}{I_{1\text{ном}}} \right)^2 \frac{r'_{2\xi}}{r'_2} S_{\text{ном}}, \quad (2-51)$$

где $r_{2\xi}$ — активное сопротивление ротора при скольжении $s=1$; r'_2 — активное сопротивление ротора при номинальном скольжении $s=S_{\text{ном}}$.

В (2-51) допускается, что $I'_{2\text{п}}/I'_{2\text{ном}} \approx I_{1\text{ном}}$.

Из (2-51) видно, что для ротора с постоянными параметрами, где $r'_{2\xi}/r'_2 = 1$, кратность начального пускового момента при заданной кратности начального пускового тока зависит только от номинального скольжения. Получение приемлемых значений кратности начального пускового момента в таких машинах часто связано с чрезмерным увеличением $S_{\text{ном}}$, что приводит к росту потерь в обмотке ротора, снижению к. п. д. и увеличению нагрева машины. Следовательно, ротор с глубоким пазом всегда является предпочтительным по сравнению с ротором с постоянными параметрами, так как позволяет получить заданные пусковые характеристики без ухудшения параметров рабочего режима.

Однако высота паза ротора ограничивается ранее выбранными размерами: внешним и внутренним диаметрами ротора. Внешний диаметр ротора D_{a2} определяется внутренним диаметром статора D_{i1} . Внутренний диаметр ротора D_{i2} должен быть больше стандартизированного диаметра выступающего конца вала на величину, обеспечивающую монтаж конструктивных элементов ротора (подшипников, подшипниковых крышек, уплотнений и др.), составляет $D_{i2} \approx 0,4 D_{a2}$. Указанные условия в двигателях с непосредственной посадкой ротора на вал ограничивают высоту паза ротора значением $h_{z2} \leq 0,2 D_{a2}$. Это означает, что глубокие пазы с $h_{z2} > 15$ мм могут быть применены для двигателей с $D_{i1} > 75$ мм, т. е. с высотами оси вращения более 80 мм.

Кратность пускового момента двигателя с глубоким пазом ротора при ограниченных значениях кратности начального пускового тока и номинального скольжения

будет зависеть от степени увеличения активного сопротивления ротора при пуске:

$$\frac{r'_{2\xi}}{r'_2} = \frac{Q_{\text{п2}}/Q_{\text{п2r}} + r'_R/r_c}{1 + r'_R/r_c}, \quad (2-52)$$

где $Q_{\text{п2}}/Q_{\text{п2r}}$ — отношение площади стержня ротора к площади части этого стержня, ограниченной глубиной проникновения тока (для ротора, залитого алюминием, 15 мм); r'_R/r_c — отношение приведенного к стержню сопротивления двух участков короткозамыкающих колец, расположенных между двумя соседними пазами, к сопротивлению стержня ротора.

Отношение r'_R/r_c примерно постоянно для данного числа полюсов (для двигателей с $2p=4$ $r'_R/r_c \approx 0,4$). Отношение $Q_{\text{п2}}/Q_{\text{п2r}}$ увеличивается с увеличением высоты паза ротора от 1 (для двигателей с высотой оси вращения до 90 мм) до 3 (для двигателей с $h=355$ мм).

Если принять, что кратность пускового тока четырехполюсных машин должна быть не более 7, а номинальное скольжение составляет примерно 0,015, то нетрудно убедиться, что кратность начального пускового момента не превысит 1,8.

В тех случаях, когда требуются большие кратности пускового момента, применяется ротор с двойной клеткой (см. рис. 5-11, а). Применение ротора с двойной клеткой связано с некоторым ухудшением рабочих характеристик и поэтому ограничено специальной модификацией двигателей с повышенным пусковым моментом. Такие двигатели при прочих равных условиях имеют кратность пускового момента на 10—35% больше, чем двигатели с глубоким пазом ротора.

Ротеры с «бутылочным» пазом (см. рис. 5-8, е), обладающие повышенным реактивным сопротивлением вследствие большого пазового рассеяния, применяются в случаях, когда необходимо ограничить кратность пускового тока при сравнительно невысоких кратностях пускового момента. Это относится в первую очередь к двухполюсным двигателям мощностью свыше 75 кВт.

Ротеры с чередующимися «бутылочными» и круглыми (см. рис. 5-11, б) пазами, являющиеся разновидностью роторов с двойной клеткой, применяются при необходимости получения специальной, близкой к «экскаваторной» формы механической характеристики.

Закрытые пазы ротора (см. рис. 5-8, *д*) применяются для снижения пускового тока главным образом в двухполюсных двигателях мощностью до 75 кВт, а также в двигателях мощностью свыше 100 кВт при $2p \geq 4$, причем в последних для увеличения кратности начального пускового момента принимается $d_1 < d_2$.

Во всех остальных случаях более эффективными являются полузакрытые пазы (см. рис. 5-8, *б*). Однако при заливке роторов алюминием и последующей их механической обработке алюминий из шлицев заволакивает поверхность роторов, образуя хорошо проводящий слой, что приводит к повышению добавочных потерь и увеличению нагрева машины. Во избежание этих явлений рекомендуется применять паз, показанный на рис. 5-8, *в*. При этом мостик над шлицем выбирается такой высоты, которая обеспечивает насыщение его от полей рассеяния в рабочем режиме, что эквивалентно открытому шлицу.

Для двигателей мощностью до 100 кВт значение b_{s2} , как правило, не превышает 1—1,5 мм, а высота $h_s = 0,5$ —1 мм. Высота мостика над шлицем (см. рис. 5-8, *в*) составляет 0,2—0,3 мм. Для закрытых пазов (см. рис. 5-8, *д*) высота мостика над пазом h_s принимается не более 1—1,5 мм.

Для двигателей мощностью свыше 100 кВт и $2p = 2$ высота мостика над закрытым «бутылочным» пазом принимается равной 1 мм, для двигателей остальных полюсностей этого участка серии с закрытыми овальными трапецидальными пазами (см. рис. 5-8, *д*) $h_s = 0,5$ мм.

2-7. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Требования к конструкции двигателей общего назначения изложены в § 1-2.

Не останавливаясь на детальном рассмотрении конструкции асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В и расчете ее элементов, которые приведены в гл. 10 и 15, рассмотрим лишь те положения, которые являются исходными при проектировании.

а) Конструктивная схема

Конструктивная схема двигателя выбирается в зависимости от заданной степени защиты и способа охлаждения. Для асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В общего назначения, как уже упоминалось выше, в мировой практике приняты степени защиты IP44 и IP23 (22).

Токоведущие и вращающиеся части двигателей со степенью защиты IP44, исходя из характеристик этой степени по ГОСТ 14254-69, должны быть защищены от соприкосновения инструмента проволоки и других подобных предметов, толщина которых превышает 1 мм; от попадания твердых посторонних тел размерами не менее 1 мм и брызг воды, попадающих на оболочку в любом направлении. Очевидно, что эти требования практически исключают возможность непосредственного охлаждения активных частей двигателя воздухом окружающей среды. Ввиду того что естественное охлаждение таких машин является весьма неэффективным, необходимо принудительное воздушное или водяное охлаждение. В асинхронных двигателях общего назначения на напряжение до 1000 В водяное охлаждение практически не применяется ввиду высокой стоимости охладительных устройств и существенного усложнения конструкции машин, делающего их непригодными для массового производства. Для серийных двигателей разработан особый способ собственного охлаждения (IC0141 по ГОСТ 20459-75), который известен под названием «наружного обдува» (или обдуваемое исполнение). Конструктивная схема асинхронного двигателя со степенью защиты IP44 и наружным обдувом оболочки показана на рис. 15-1. Машина при этом полностью закрыта, а установленный снаружи на валу вентилятор с помощью направляющего кожуха прогоняет воздух вдоль поверхности станины. Для улучшения теплотдачи на оболочке предусматриваются ребра.

По сравнению с посторонним воздушным охлаждением преимущества такого способа охлаждения заключаются в отсутствии каких-либо дополнительных устройств и чрезвычайной технологичности конструкции. Эти преимущества оцениваются в практических условиях очень высоко, из-за чего закрытые обдуваемые электродвигатели получили широкое распространение. Они изготавливаются всеми фирмами мира в виде стандартных серий, охватывающих мощности от 0,06 до 400 кВт при высотах оси вращения от 50 до 400 мм.

С увеличением радиальных размеров машин увеличивается перепад температур между обмоткой статора и наружной поверхностью оболочки и уменьшается удельная поверхность охлаждения, вследствие чего охлаждение только наружным обдувом оказывается недостаточным. В таких случаях должны быть предусмотрены меры, направленные на уменьшение внутренних перепадов температур. В серии 4А такой мерой явилось дополнительное (форсированное) охлаждение ротора двигателей мощностью свыше 100 кВт (высоты оси вращения 280—355 мм).

Конструктивная схема асинхронного двигателя с дополнительным охлаждением ротора представлена на рис. 15-5.

Активные части двигателей со степенью защиты IP23(22) должны быть защищены от дождя, падающего на оболочку под углом не более 60° (IP23) или не более 15° (IP22) к вертикали.

Оболочка этих двигателей должна защищать от возможности соприкосновения пальцев с токоведущими и вращающимися частями и от попадания твердых посторонних тел диаметром не менее 12,5 мм внутрь машины. В двигателях со степенью защиты IP23(22) возможно и целесообразно охлаждение активных частей воздухом окружающей среды (способ охлаждения IC01 по ГОСТ 20459-75), так как это позволяет, начиная с определенной высоты оси враще-

ния (см. § 2-1), повысить мощность на одну ступень по сравнению с мощностью машин со степенью защиты IP44.

Конструктивная схема двигателя со степенью защиты IP23 (22) выбирается в зависимости от системы вентиляции. При этом возможны два основных варианта: аксиальная и радиальная вентиляция. При аксиальной системе вентиляции воздух специальным вентилятором, укрепленным на валу двигателя, прогоняется вдоль оси машины двумя параллельными потоками: вдоль спинки статора и по аксиальным каналам ротора, охлаждая таким образом активные части. В двигателях с симметричной радиальной двусторонней вентиляцией (см. рис. 15-2) роль вентиляторов выполняют лопасти ротора, засасывающие воздух через торцевые окна подшипниковых щитов. Воздух омывает лобовые части обмотки и спинку статора и выбрасывается через боковые окна корпуса. Эффективность системы вентиляции, оцениваемая отношением греющих потерь к поверхности сердечника и к превышению температуры обмотки статора, выше для радиальной системы вентиляции.

Двигатели с аксиальной системой вентиляции имеют несколько меньший к. п. д. за счет механических потерь, обусловленных наличием специального вентилятора сравнительно большого диаметра [17].

Кроме того, применение радиальной системы вентиляции дает возможность получить одинаковые базовые размеры элементов оболочки (корпусов и подшипниковых щитов) двигателей с исполнением по степени защиты IP44 и IP23 (22), т. е. производить их механическую обработку на одном и том же оборудовании и оснастке. Наличие специального вентилятора, размещаемого внутри оболочки при аксиальной системе вентиляции, делает невозможной такую унификацию.

Приобретение специального технологического оборудования для производства сравнительно небольшого количества двигателей со степенью защиты IP23 (22) нецелесообразно. Сказанное дает основание сделать заключение о предпочтительности радиальной системы вентиляции двигателей со степенью защиты IP23 (22).

б) Материал оболочки

Оболочка асинхронного двигателя (станина, подшипниковые щиты) является основным конструктивным элементом машины. Детали оболочки являются несущими и обеспечивают заданную соосность ротора и статора. Оболочка двигателя осуществляет защиту активных частей от воздействия окружающей среды. И, наконец, оболочка двигателя со степенью защиты IP44 является радиатором, через который отводится теплота от активных частей. Исходя из необходимости обеспечения перечисленных функций и выбирается материал оболочки. При этом необходимыми условиями являются технологичность материала и стабильность его свойств.

Для серии асинхронных двигателей, включающей в себя машины мощностью от десятков ватт до сотен киловатт, отличающихся размерами, характером и технологией производства, нецелесообразно иметь один и тот же материал оболочки.

Для машин малой мощности наилучшим материалом для оболочек являются алюминиевые сплавы. Они обладают хорошими литейными свойствами и хорошо обрабатываются. Оболочки, отлитые

из алюминиевых сплавов в кокиль или под давлением, имеют точные размеры и хорошую поверхность, обладают высокой теплопроводностью. С ростом мощности и размеров машин возрастают и механические нагрузки на элементы конструкции как при обработке в производстве, так и в эксплуатации. В этих условиях трудно получить стабильные размеры элементов оболочки в производстве и сохранить их при эксплуатации. Поэтому с алюминиевыми станинами и щитами целесообразно проектировать только машины с высотами оси вращения 50—63 мм. В двигателях больших размеров с высотами оси вращения 71—112 мм целесообразно сохранить алюминиевую станину, а подшипниковые щиты, стабильность размеров посадочных мест которых особо важна для правильного функционирования машины, следует предусматривать литыми из серого чугуна.

Сказанное не исключает возможности изготовления оболочек таких машин из алюминиевых сплавов, если последние будут обладать достаточной прочностью, а конструкция элементов оболочки обеспечит ее жесткость. Так, фирма ASEA (Швеция) выпускает асинхронные двигатели серии M, имеющие оболочки из алюминиевого сплава при высоте оси вращения до 225 мм.

Оболочки двигателей с высотами оси вращения более 112—132 мм обычно выполняются литыми из чугуна.

В двигателях с высотами оси вращения 280—355 мм наряду с чугунными оболочками (исполнение степени защиты IP44) применяются стальные сварные (исполнение по степени защиты IP23). Этому способствует наличие прогрессивного автоматического сварочного оборудования.

Глава третья

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

3-1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

а) Постановка задачи нелинейного программирования

Задача проектирования электрической машины ограничена достаточно жесткими рамками технического задания. Тем не менее полтора-два десятка определяющих параметров конструктор может выбрать практически независимо друг от друга и от ограничений технического задания. Если каждый параметр при этом взять только на двух уровнях, то число возможных вариантов составит $2^{15}—2^{20}$, т. е. превысит миллион. Тем не менее

уже в 20-х годах текущего столетия инженеры достаточно уверенно проектировали машины по методу проб и ошибок. Накопленный к тому времени опыт убедил проектировщиков, что при изменении независимых переменных в разумных пределах рабочие характеристики машин получались более или менее удовлетворительными. Рассчитав десяток вариантов, можно было установить направление изменения интересующего выходного параметра и затем остановиться на приемлемом. Что же касается экономики, то при малых объемах выпуска вопрос решался принятием варианта, лучшего по техническим показателям. Со временем увеличивалось число технических требований, а сами требования ужесточались. Все меньшая доля рассчитанных вариантов удовлетворяла техническому заданию. Требования к экономике также возрастали в связи с увеличением объемов производства. Эти обстоятельства определили потребность в регулярных методах отыскания оптимального варианта. Предпосылкой применения таких методов явилась возможность использования для этих целей ЭВМ.

Задача нахождения оптимальных размеров электрических машин восходит к М. Видмару, который оптимизировал квадратичные формы двух переменных [18]. В такой постановке задача теряла свой прикладной смысл и являлась не более чем изящной иллюстрацией существования экстремума по стоимости. Сам М. Видмар понимал несовершенство своей теории экономической соразмерности, и более поздними исследованиями эта теория была дополнена понятиями действительной (обобщенной) стоимости, что позволило учесть условия эксплуатации [19, 20]. Однако этот учет не вывел задачу из рамок двумерного пространства и не избавил от необходимости последовательных приближений. Причина неприемлемости этой теории для практических расчетов и сильного усложнения при переходе к пространству большего числа переменных заключается в необходимости удовлетворять техническим требованиям, заданным в виде неравенств.

Математическим аппаратом, специально созданным для решения задач оптимизации нелинейных функций с линейными и (или) нелинейными ограничениями, является нелинейное программирование. Задача нелинейного программирования может быть сформулирована

следующим образом: найти вектор x , минимизирующий (максимизирующий) функцию

$$\left. \begin{aligned} F(x) \text{ при } f_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, m; \\ F(x) \text{ при } q_j(x) = 0, j = m + 1, \dots, p, \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

где $F(x)$ — целевая функция; x — вектор-столбец в n -мерном пространстве, составляющие которого $x_1, \dots, x_n$ являются независимыми переменными $f_j(x)$ и $g_i(x)$ — линейные и (или) нелинейные ограничения (лимитеры).

Выражение (3-1) можно представить в следующем виде: минимизировать

$$\{F(x) | x \in R\}, \quad (3-2)$$

где R — заданная ограничениями $f_j(x)$ и $g_j(x)$ область изменения вектора x , т. е.

$$R = \{x | f_j(x) \leq 0, g_j(x) = 0 \text{ для всех } j\}.$$

Вектор x^* , удовлетворяющий (3-1), называется оптимальной точкой, а соответствующее значение $F(x^*)$ — оптимальным значением целевой функции. $F(x^*)$ и x^* составляют оптимальное решение.

б) Выбор критерия оптимальности

Выбор критерия оптимальности является весьма ответственным этапом проектирования и определяется в результате технической или технико-экономической оценки.

Если машина имеет узкоспециализированное назначение, то в качестве критерия оптимальности могут выступать определенные функциональные характеристики, оговоренные в техническом задании (максимальная мощность, максимальный момент, минимальная масса двигателя, минимальный расход меди, минимальная длина, максимальный к. п. д., максимальный коэффициент мощности и т. д.).

Для двигателей общего назначения критерий оптимальности должен отражать народнохозяйственную эффективность. Опыт расчетов серий А2 и 4А показал, что достаточно правильно отражает народнохозяйственную эффективность критерий минимума приведенных затрат Z_T за нормативный срок окупаемости [см. (13-7)].

В общем виде величина Z_T определяется выражением

$$Z_T(x, y) = C'_n(x, y) + C_s(x, y), \quad (3-3)$$

где $C'_н$ — затраты на разработку, внедрение, изготовление, монтаж двигателя; $C_о$ — затраты на обслуживание двигателя при эксплуатации, компенсирующие устройства, оплата активных потерь электроэнергии и т. д.; x — вектор независимых переменных, варьируемых при оптимизации машины (диаметры и длина сердечника статора, число витков, высота и ширина пазов статора и ротора и т. п.); y — вектор исходных данных (воздушный зазор между статором и ротором, число и форма пазов статора и ротора, кривая намагничивания и удельные потери стали сердечника, удельная электрическая проводимость материала обмоток статора и ротора, класс нагревостойкости и толщина витковой и корпусной изоляции), а также исходных данных для теплового расчета (коэффициенты теплопроводности, коэффициенты теплоотдачи и т. д.) и постоянные экономического расчета.

Вопросы определения основных исходных данных для оптимального проектирования изложены в гл. 2. Исходные данные для теплового расчета приведены в гл. 9, а для экономического расчета — в гл. 13. Обычно стремятся в формуле приведенных затрат (3-3) учесть возможно более полно все составляющие, которые зависят от переменных проектирования. Во-первых, использование более полных и более сложных формул расчета критерия практически не увеличивает время расчета на ЭВМ. Во-вторых, оптимальная в смысле принятого критерия машина затем подвергается более детальной экономической оценке со стороны плановиков и экономистов, которые учитывают условия производства и эксплуатации, определяют экономию и народнохозяйственную эффективность. Естественно, что методы оценки машины проектировщиками и экономистами должны быть едины или по крайней мере близки.

Следует отметить, что для поиска оптимальной машины не обязательно, чтобы целевая функция полно и точно отражала все составляющие затрат. Важно то, что применяемая функция приводила бы к координатам оптимальной точки с достаточной наперед заданной степенью точности. В этом направлении и происходит совершенствование целевой функции.

Использование различных, но связанных между собой критериев оправдано и в тех случаях, когда необ-

ходимо применить готовую программу для проектирования машины с другим критерием оптимальности.

При проектировании серии 4А целевая функция была представлена в следующем виде:

$$Z_T = (C_d + C_R)(1 + T_n p_o) + C_a T_n, \quad (3-4)$$

C_d — производственная себестоимость двигателя; C_R — стоимость компенсирующих устройств; T_n — нормативный коэффициент окупаемости; P_o — относительные затраты на обслуживание и амортизационные отчисления; C_a — годовые затраты на активные потери электроэнергии.

Целевая функция, использованная при проектировании серии 4А, по ряду причин не учитывала некоторые важные составляющие приведенных затрат. Дальнейшее совершенствование функции должно пойти по пути обоснованного включения дополнительных составляющих. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

1) наличие значимой зависимости дополнительных составляющих затрат от принятых переменных, варьируемых при расчете;

2) наличие приемлемой в отношении размера и потребного машинного времени программы расчета дополнительной составляющей.

Рассмотрим с изложенной позиции некоторые дополнительные составляющие целевой функции.

Экономический эффект у потребителя от повышения компактности двигателей. Показателем компактности $k_{\text{комп}}$ может служить отношение номинальной мощности двигателя к объему описанного прямоугольного параллелепипеда (без учета выступающего конца вала):

$$k_{\text{комп}} = \frac{P_2}{h_{31} (0,5d_{30} + b_{31}) (l_{30} - l_1)} \approx \frac{P_2}{4h^2 (l_{30} - l_1)} \quad (3-5)$$

или отношение длины l_{30} сравниваемых машин одинаковой мощности и одинаковой высоты оси вращения.

В (3-5) и (3-6) принято:

$$k_{\text{комп}} = l'_{30} / l_{30}, \quad (3-6)$$

где h — высота оси вращения; l_1 — длина выступающего конца вала; l_{30} , h_{31} , d_{30} , b_{31} — габаритные размеры двигателя (ГОСТ 4541-70); l'_{30} — габаритная длина двигателя, принятого за эталон при сравнении.

Более компактные электродвигатели дают возможность создать более компактное оборудование, что приведет к сокращению потребных производственных площадей, снижению транспортных расходов, а в некоторых случаях — к снижению материалоемкости объекта. Влияние компактности двигателя на экономические показатели объекта было изучено на примере станкостроения. В результате рассмотрения схем расположения приводов в 600 моделях станков установлено, что в 40% типов станков двигатели выступают за пределы станка по длине или ширине.

Установлено уравнение регрессии размера станка B , м, на стороне крепления двигателя на номинальную мощность двигателя P_2 , кВт,

$$B = 2,5 + 1,9 \lg P_2. \quad (3-7)$$

Стоимость производственной площади $C_{п.п.}$, необходимая для размещения двигателя, может быть ориентировочно определена по формуле

$$C_{п.п.} = 0,4B(l_{30} - l_1) C_{п.} \quad (3-8)$$

где $C_{п.} = 80 \div 100$ руб/м² — средняя стоимость 1 м² производственной площади.

При оптимальном проектировании может учитываться не вся стоимость производственной площади, а только часть ее, определяемая изменением компактности двигателя:

$$C_{комп} = 0,4B\Delta l_{30} C_{п.} \quad (3-9)$$

Составляющая $C_{комп}$ может быть включена в целевую функцию только при наличии значимой зависимости между Δl_{30} и переменными, варьируемыми при расчете: длиной сердечника, а также размерами паза и внутренним диаметром сердечника статора, определяющими длину вылета лобовой части обмотки. Станкостроение потребляет 13% выпуска асинхронных двигателей. Существует несколько таких же крупных потребителей: насосостроение, вентиляторостроение, производство холодильных установок, оборудование для легкой, пищевой промышленности и торговли, которые потребляют в совокупности около 80% всех асинхронных двигателей. Продукция этих отраслей принципиально не отличается от станков по влиянию размеров двигателя на площадь, занимаемую объектом. Разумеется уравнение регрессии (3-8) следует уточнить. Из сказан-

ного вытекает целесообразность включения в целевую функцию при выполнении условия (1) составляющей, отражающей затраты у потребителя в зависимости от размеров двигателя.

Экономический эффект у потребителя от снижения уровня шума двигателей. Отрицательные экономические последствия высокого уровня шума в производстве проявляются в виде увеличения потерь рабочего времени в результате частичной нетрудоспособности, снижения производительности труда и ухудшения качества выпускаемой продукции. Установлено, что увеличение уровня шума на 1 дБ по шкале А приводит к уменьшению фонда рабочего времени на 0,5%, что соответствует снижению годового прибавочного продукта на 10 руб. в расчете на одного рабочего [23].

Экономия у потребителя от снижения уровня шума электродвигателя $\mathcal{E}_{ш}$, руб, предлагается приближенно оценивать по формуле:

$$\mathcal{E}_{ш} = 17,4 P k_{экт} \Delta P_{зв} \cdot 10^{-0,1 L_{ш.ц}} N^{0,44} v^{-0,56}, \quad (3-10)$$

где $\Delta P_{зв}$ — снижение звуковой мощности двигателя, Вт; $k_{экт}$ — коэффициент экстенсивности использования двигателя, для машиностроительных предприятий можно принять $k_{экт} = 0,40$; N — число рабочих в некотором усредненном цехе, можно принять равным 200 за две смены; P — приращение годового прибавочного продукта на человека при снижении уровня шума цеха на 1 дБ; v — средний объем цеха, приходящийся на одного рабочего, можно принять равным 150 м³; $L_{ш.ц}$ — уровень шума цеха, дБ.

Некоторую условность в формуле (3-10) вносит условная численность рабочих N . Однако ошибка в определении $\mathcal{E}_{ш}$ в 2,5 раза меньше ошибки в численности рабочих.

Если учет экономического эффекта от повышения компактности увеличивает программу расчета всего на три операции [определение изменения длины Δl_{30} , определение экономического эффекта у потребителя (3-9), сложение с целевой функцией для определения эффекта в масштабе народного хозяйства], то учет экономического эффекта от снижения уровня шума значительно более сложен.

Во-первых, по (3-10) рассчитывается только экономия у потребителя, а для получения экономического

эффекта в масштабе народного хозяйства необходимо еще определить затраты у изготовителя, направленные на снижение уровня шума двигателей.

Во-вторых, в двух- и четырехполюсных двигателях со степенью защиты IP44 уровень шума определяется, как правило, вентиляционным узлом, параметры которого при оптимальном расчете активной части двигателя не варьируются.

В-третьих, даже расчет магнитного шума, роль которого существенна в многополюсных машинах, не включается в поисковый расчет, так как требует значительных затрат машинного времени.

В-четвертых, расчет уровней шума механического происхождения также не входит в поисковый расчет двигателя.

По изложенным причинам экономическая оценка уровня шума двигателя не могла быть включена в поисковые расчеты серии 4А, которые выполнялись на ЭВМ типа «Минск-32». В дальнейшем с увеличением производительности труда экономия от снижения уровня шума будет возрастать. В ближайшем будущем уровень шума будет одним из самых важных показателей двигателя, и его экономическую оценку необходимо будет включать в поисковый расчет двигателя.

3-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА НЕЗАВИСИМЫХ ВАРИРУЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ И ОГРАНИЧЕНИЙ

а) Состав независимых варьируемых переменных

На выбор числа независимых переменных основное влияние оказывают два противоречивых обстоятельства:

- 1) возможности современных ЭВМ;
- 2) точность отыскания координат оптимальной точки.

Рассмотрим подробнее оба вопроса.

Полагая, что объем вычислений N пропорционален числу обращений к целевой функции, получаем в случае полного перебора

$$N = k^n, \quad (3-11)$$

где k — число возможных шагов по каждой переменной; n — число независимых переменных.

В случае направленного поиска объем вычислений возрастает в меньшей степени, но тоже значительно.

С другой стороны, многие исследователи считают, что увеличение числа независимых переменных улучшает целевую функцию. Более того, иногда бытует мнение, что число независимых переменных само по себе является мерой качества целевой функции.

Покажем, что не всякое увеличение числа независимых переменных эффективно улучшает целевую функцию. Проще всего это сделать на примере квадратичной функции.

На основании опыта по оптимизации электрических машин есть основания полагать, что целевая функция близка именно к квадратичной форме, т. е.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_i x_j. \quad (3-12)$$

В матричной записи выражение (3-12) имеет вид:

$$F(x) = x' C x, \quad (3-13)$$

где x' — транспонированная вектор-строка независимых варьируемых переменных; C — действительная симметрическая квадратная матрица n -го порядка.

На практике многими недиагональными элементами матрицы C можно пренебречь:

$$c_{ij} \approx 0.$$

Это облегчает решение, особенно когда C может быть представлена в виде квазидиагональной матрицы (диагональной матрицы, по главной диагонали которой расположены квадратные подматрицы, например, порядков s, m, k).

Матрица распадается на три ортогональных блока, а целевая функция — на три независимые составляющие:

$$F(x) = F_s(x_s) + F_m(x_m) + F_k(x_k), \quad (3-14)$$

где x_s, x_m, x_k — s -, m -, k -мерные векторы.

Возможность разложения целевой функции на ортогональные составляющие очень важна по двум причинам. Во-первых, трудоемкость решения в случае квазидиагональной матрицы зависит от максимального ранга блока, а не от суммы рангов всех блоков. Во-вторых, оптимизацию можно проводить в каждом блоке автономно, не ожидая оптимизации остальных, причем с уверенностью, что при оптимизации остальных блоков

ранее полученные результаты не будут подвергаться пересмотру, т. е.

$$\min F(x) = \min F_s(x_s) + \min F_m(x_m) + \min F_k(x_k). \quad (3-15)$$

Практические результаты работ по оптимизации отдельных блоков также можно внедрять, не ожидая окончания работ по остальным блокам. Например, оптимизацию оребрения оболочки нет смысла решать в одной программе с оптимизацией активной части.

Таким образом, важнейшим основанием для включения какой-то переменной в программу одновременной оптимизации является наличие достаточно больших коэффициентов взаимодействия с остальными переменными проектирования. Если такие коэффициенты малы, то оптимизация по дополнительным переменным может быть произведена автономно.

Если переменная x_{n+1} имеет достаточно большие коэффициенты взаимодействия с составляющими вектора x , то критерием для включения ее в программу оптимизации можно считать степень ее влияния на оптимум в пределах вариации. Назовем эффективностью включения переменной x_{n+1} в программу оптимизации величину приращения минимума целевой функции

$$\Delta_{n+1} = \min F_n(x) - \min F_{n+1}(x, x_{n+1}). \quad (3-16)$$

Это приращение асимптотически убывает при увеличении номера n при условии, что предшествующее ранжирование было полным. Сказанное относится не только к переменным, но и к блокам переменных. Необходимые для ранжирования числовые данные могут быть получены из опыта оптимального проектирования, в процессе которого отсеиваются мало влияющие или слабо связанные переменные.

Рассмотрим порядок определения состава варьируемых переменных применительно к асинхронным двигателям единых серий.

1. Составляем полный список величин, которые могут назначаться независимо друг от друга.

2. Группируем переменные по блокам:

- а) конструкция активной части двигателя;
- б) конструкция системы изоляции;
- в) конструкция системы вентиляции.

Конструкция активной части:

внешний диаметр сердечника статора D_{a1} ;

внутренний диаметр сердечника статора D_{i1} ;

длина сердечника статора l_1 ;

число витков обмотки фазы статора w_1 ;

ширина паза статора b_1 ;

высота паза статора h_{z1} ;

ширина паза ротора $b_2(d)$;

высота паза ротора h_{z2} ;

воздушный зазор δ ;

числа зубцов ротора и статора z_1 и z_2 ;

высота и ширина открытия паза статора b_{s1} и h_s .

Конструкция системы изоляции:

толщина витковой изоляции $\delta_{и.вр}$;

толщина пазовой изоляции $\Delta_{и.п1}$;

высота клина $h_{кл}$.

Конструкция системы вентиляции двигателя со степенью защиты IP44:

число ребер станины n_p ;

высота ребер h_p ;

наружный и внутренний диаметры лопаток вентилятора D_2 и D_1 ;

ширина лопаток вентилятора b .

Переменные второго блока практически не подлежат оптимизации, так как без учета ограничений оптимальные значения $\delta_{и.вр}$ и $\Delta_{и.п1}$ равны нулю. Исходя из необходимости обеспечения заданной надежности обмотки и приемлемой трудоемкости изготовления, назначаются минимальные значения этих параметров.

В качестве целевой функции при оптимизации вентиляционной системы двигателей со степенью защиты IP44 может быть принят коэффициент теплоотдачи с оболочки, который учитывается в определении превышения температуры обмотки при оптимизации активной части. При необходимости непосредственного расчета эффективности оптимизации вентиляционной системы может быть осуществлен переход от достигнутого снижения превышения температуры к эквивалентному приращению целевой функции с помощью аппарата коэффициентов влияния, описанного в § 3-4.

Что касается независимых переменных первого блока, то такие параметры, как δ , z_1 и z_2 , задаются заранее из соображений, изложенных в гл. 2. Там же указаны и значения b_{s1} и h_s . Таким образом, δ , z_1 , z_2 , b_{s1} и h_s могут быть исключены из разряда независимых переменных и переведены в разряд исходных данных. Оставшиеся во-

семь параметров: внешний и внутренний диаметры статора, размеры пазов статора и ротора и число витков обмотки фазы — представляют собой максимальный состав варьируемых переменных оптимального проектирования. В конкретных случаях этот набор может быть меньше. Так, при заданной высоте оси вращения внешний диаметр сердечника D_{a1} является независимой пе-

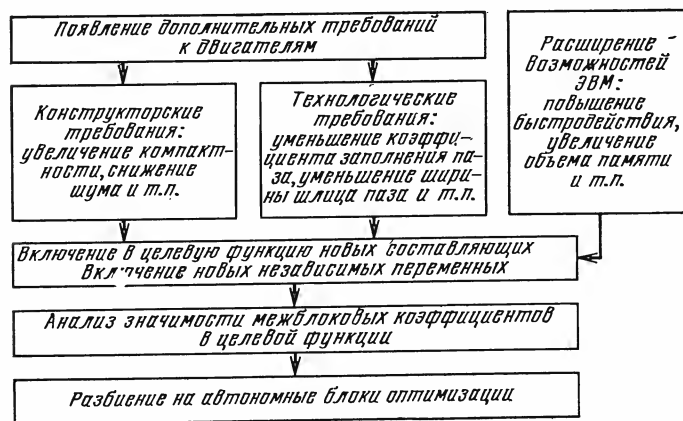


Рис. 3-1. Схема порядка включения новых переменных в схему проектирования.

ременной, варьируемой в пределах, указанных в гл. 2, только для четырехполюсных двигателей (как наиболее массовых) второй длины (как наиболее нагруженных в тепловом отношении).

Для двигателей других полюсностей данной высоты оси вращения D_{a1} переходит в разряд исходных данных.

Для двигателей первых длин варьируемыми параметрами являются длина сердечника и число витков обмотки статора.

Восьмиполюсные двигатели могут быть унифицированы с шестиполюсными двигателями по внутреннему диаметру статора или целиком по геометрии активной части. В этом случае состав варьируемых переменных для восьмиполюсных двигателей значительно сокращается. При проектировании модификаций — двигателей с повышенным скольжением, с повышенным пусковым моментом — независимыми варьируемыми перемен-

ными являются только размеры паза ротора, а в ряде случаев и число витков обмотки статора.

Если изменение размеров штампов нецелесообразно, то варьируются только длина сердечника и число витков обмотки статора.

Может быть также реализована специальная программа ранжирования независимых переменных методами регрессионного и дисперсионного анализов с помощью теории планирования эксперимента.

На схеме (рис. 3-1) показана причинная последовательность включения и группирования по блокам новых независимых переменных.

б) Состав ограничений (лимитеров)

Целевая функция серии в широком смысле — это повышение народнохозяйственной эффективности изделий при удовлетворении требований потребителей и стандартов. Строго говоря, в терминах математического программирования целевой функцией серии в узком смысле является максимизация народнохозяйственной эффективности изделий, а требования потребителей и базовых стандартов являются ограничениями.

Вообще деление широкой целевой функции на узкую целевую и ограничения производится достаточно произвольно. Технические ограничения, такие как допускаемое превышение температуры обмотки, моментные и виброшумовые характеристики, — это тоже цели, которых нужно достигнуть в процессе разработки. Обычно к узкой целевой функции относят цели, обладающие свойствами аддитивности, с конечными количественными характеристиками одинаковой размерности. К ограничениям относят такие свойства изделий, количественные оценки которых не аддитивны ни между собой, ни с узкой целевой функцией. Наличие ограничений отражает материальную и информационную взаимосвязь серии с другими системами и объектами.

Принято в качестве ограничений при оптимальном проектировании активной части двигателя считать требования электропривода (начальный пусковой, минимальный и максимальный моменты, начальный пусковой ток), требования надежности (наибольшая допускаемая температура обмотки статора, скорость нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе),

требования приемлемой технологии изготовления (коэффициент заполнения паза, ширина зубца, диаметр дна овального паза ротора), требования жесткости конструкции (высота спинки статора) и некоторые другие.

При оптимизации изоляционной системы в качестве ограничений могут быть приняты допустимый уровень вентиляционного шума, мощность, забираемая вентилятором, и т. д.

3.3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

а) Геометрическая интерпретация задачи программирования

Для наглядности рассмотрим целевую функцию двух переменных $F(x_1, x_2)$ при ограничениях $f_1(x_1, x_2) \leq 0$; $x_1 \geq 0$; $x_2 \geq 0$.

Придавая функции $F(x_1, x_2)$ некоторые постоянные значения $c_1, c_2, \dots, c_n$, получаем семейство уравнений

$$\begin{cases} F(x_1, x_2) = c_1; \\ F(x_1, x_2) = c_2; \\ F(x_1, x_2) = c_n. \end{cases} \quad (3-17)$$

Кривые, соответствующие этим уравнениям на плоскости x_1, x_2 , называются линиями уровней (рис. 3-2). Область допустимых значений x ограничивается осями координат и кривой $f_1=0$ (рис. 3-1). Оптимальной точкой в данном случае является точка x^* , которая лежит на границе допустимой области и придает минимальное значение целевой функции.

Если для линейного программирования существуют регулярные методы отыскания оптимального решения, то для нелинейного про-

граммирования таких методов не найдено. Несмотря на отдельные успехи, общая теория нелинейного программирования еще окончательно не сформировалась, поэтому приходится пользоваться различными методами нелинейного программирования, эффективность которых в конкретных случаях зависит от вида целевых функций и ограничений. Прежде чем приступить к описанию методов, вкратце рассмотрим некоторые конкретные виды целевых функций и ограничений.

В допустимой области R целевая функция может иметь один или несколько локальных экстре-

мумов. В первом случае функция называется унимодальной, во втором — мультимодальной.

Глобальное оптимальное решение представляет собой наименьшее значение $F(x^*)$ для всех $x \in R$, тогда как локальное оптимальное решение представляет собой наименьшее значение $F(x^*)$ в окрестности вектора x^* .

В случае унимодальной целевой функции глобальное и локальное оптимальные решения совпадают; если целевая функция мультимодальна, то в общем случае глобальное и локальное оптимальные решения могут отличаться.

Целевая функция $F(x)$ называется выпуклой в области R , если для любых векторов x_1 и $x_2 \in R$

$$F[\theta x_1 + (1 - \theta) x_2] \leq \theta F(x_1) + (1 - \theta) F(x_2), \quad (3-18)$$

где $0 \leq \theta \leq 1$.

Область допустимых значений может быть односвязной (области I, II, III) и многосвязной, т. е. представлять собой совокупность односвязных областей (рис. 3-3). Область односвязна, если любая простая замкнутая кривая, целиком принадлежащая области, может быть стянута в точку, не выходя из области.

Область допустимых значений R называется выпуклой в n -мерном пространстве, если отрезок прямой линии, соединяющий две любые точки области, целиком принадлежит этой области.

Методы нелинейного программирования разработаны в основном применительно к односвязным выпуклым областям и унимодальным функциям цели.

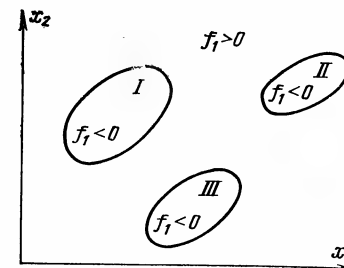


Рис. 3-3. Односвязные ($f_1 < 0$) и многосвязная ($f_1 > 0$) области допустимых значений.

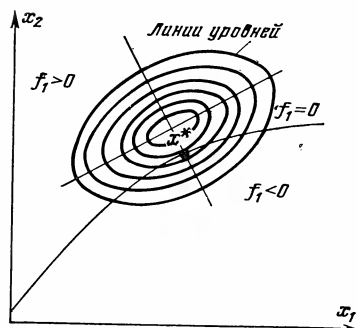


Рис. 3-2. Геометрическое представление задачи.

б) Методы поиска и их эффективность

В зависимости от правила обхода допустимой области методы нелинейного программирования делятся на три группы:

- 1) методы перебора;
- 2) методы локального поиска;
- 3) методы глобального поиска.

В методах перебора правило перехода от точки к точке задается заранее и не зависит от значений целевой функции. Оно может быть детерминированным (метод полного перебора) или случайным (метод Монте-Карло).

В методах локального поиска переход осуществляется в зависимости от поведения целевой функции в окрестности предыдущей точки. К методам локального поиска относятся метод Гаусса — Зейделя, градиентные методы.

Методами глобального поиска сначала оценивают общие характеристики целевой функции в области определения, а затем с помощью этих характеристик находят глобальный оптимум. В первую очередь к этим методам следует отнести классический метод множи-

телей Лагранжа, затем методы, использующие планирование экспериментов, и другие статистические методы. В случае мультимодальной целевой функции глобальный поиск во много раз сложнее любого локального поиска.

Для сравнения и выбора подходящего метода пользуются понятием эффективности поиска. Для оценки эффективности могут быть выбраны различные критерии. Наиболее часто критерием служат затраты машинного времени на поиск и ошибка поиска или ее вероятность.

в) Метод полного перебора

Метод полного перебора (метод обхода узловых точек R -мерного пространства) является единственным методом, гарантирующим отыскание глобального оптимума с точностью до шага. По этому методу n -мерная область R допустимых значений независимых переменных, разбивается на n -мерные элементарные параллелепипеды, длина сторон которых равна шагам соответствующих независимых переменных. Упорядоченный обход узловых точек и составляет сущность метода. В каждом элементе вычисляются целевая функция и все ограничения и путем сравнения выбирается точка с минимальным значением $F(x)$. Число вариантов расчета

$$N = \prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{x_{imax} - x_{imin}}{\delta_i} \right), \quad (3-19)$$

где δ_i — шаг по i -й переменной; n — число независимых переменных.

Метод полного перебора может быть применен при числе независимых переменных до трех-четырех и сравнительно небольшой области допустимых значений x . При $n=4$ и относительном шаге $\delta=0,1$ время поиска оптимальной геометрии активной части электродвигателя на ЭВМ типа «Минск-22» составит около 4 ч.

Этот метод был применен при первом использовании ЭВМ для оптимизации серии А2 [24].

г) Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло состоит в обходе точек всей области определения по случайному алгоритму. Эффективность этого метода равна эффективности полного перебора. Отличие состоит в том, что на каждом шагу улучшается знание целевой функции по всей области. Кроме того, после ряда экспериментов область поиска может быть уменьшена. При этом лучшая точка первого этапа становится центром новой области.

д) Метод Гаусса — Зейделя

Сущность метода состоит в поочередном одномерном поиске по каждой из переменных. Этот метод очень эффективен при слабой связи между переменными. При увеличении степени связи его эффективность уменьшается, а при вырождении поверхности в гребень он не приводит к оптимуму.

е) Градиентные методы

Большое время, затрачиваемое на поиск при полном переборе, и опасность потери оптимума при методе Гаусса — Зейделя заставили математиков искать более эффективные методы. Напомним, что повышение эффективности означает сведение к минимуму числа проб, гарантирующего нахождение оптимума с заданной точностью. Геометрически это означает получение максимального изменения целевой функции на каждый шаг, т. е. при движении точки в направлении градиента (антиградиента) — рис. 3-4, поэтому наиболее об-

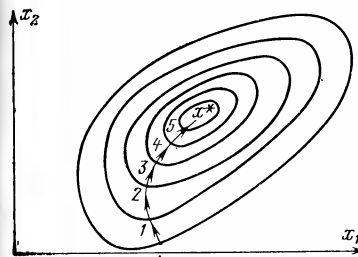


Рис. 3-4. Движение по градиенту.

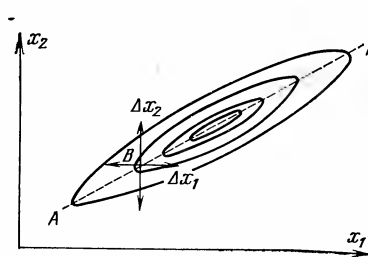


Рис. 3-5. Остановка поиска при наличии гребня.

щие методы решения оптимизационных задач разработаны именно на основе регулярных градиентных методов. В общем случае градиентные методы позволяют найти точку локального экстремума.

Градиент целевой функции

$$\text{grad } F = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_i} k_i, \quad (3-20)$$

где k_i — орты независимых переменных.

Если аналитическое дифференцирование целевой функции затруднительно, то частные производные заменяются отношением приращений

$$\text{grad } F \approx \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_i}{\Delta x_i} k_i, \quad (3-21)$$

где Δx_i — достаточно малые приращения переменной x_i ; ΔF_i — соответствующие приращения целевой функции.

Сходимость градиентных методов в значительной мере зависит от выбора масштаба независимых переменных. Удачными являются такие масштабы, при которых область допустимых значений x преобразуется в многомерный куб, а поверхности уровня целевой функции — в гиперболы. Следует помнить, что при неевклидовом пространстве независимых переменных направление градиента меняется

при изменении масштабов переменных. Это явление носит название «неевклидов парадокс».

Неудачный выбор масштабов независимых переменных может сильно вытянуть линии уровня (рис. 3-5). Линии типа AA называются гребнями. Значения функции цели в конце пробных шагов

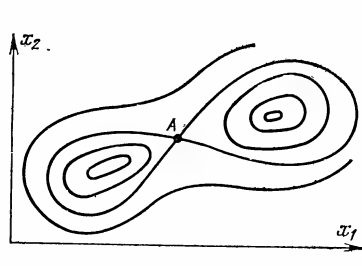


Рис. 3-6. Седловая точка.

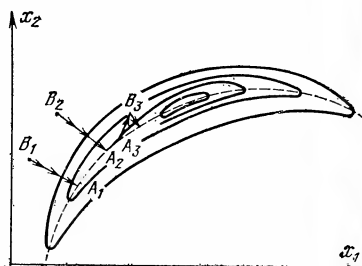


Рис. 3-7. Движение по гребню по методу И. М. Гельфанда.

$\pm \Delta x_1$ и $\pm \Delta x_2$, сделанных из точки B , меньше, чем в самой точке B . Принимается ложное решение, что точка B является оптимальной, причем поиск заканчивается на той точке гребня, на которую выходит траектория поиска. Если же шаги Δx_1 и Δx_2 невелики, а точка B не находится точно на гребне, то движение по гребню не прекращается, но носит зигзагообразный характер и вследствие этого сильно замедляется.

На рис. 3-6 показана другая неблагоприятная форма поверхности уровня, так называемое седло (A). Аналогом гребня для минимизируемой функции является овраг, поэтому методы поиска, исключаяющие остановку на гребне, называются овражными. Первым такой метод применил И. М. Гельфанд. Проверка функции на наличие оврага проводится путем двух самостоятельных поисков из точек B_1 и B_2 , отстоящих друг от друга на несколько шагов (рис. 3-7). Если при этом расстояние между оптимальными точками A_1 и A_2 существенно превышает размер шага, точки A_1 и A_2 лежат на гребне. Следующий шаг делается по прямой, соединяющей точки A_1 и A_2 , в сторону лучшей точки. Из полученной таким образом точки B_3 выполняется движение по градиенту до выхода на вершину гребня (точка A_3). Затем процедура повторяется до тех пор, пока значения целевых функций соседних точек не будут отличаться на заранее заданное малое число.

Поскольку направление градиента можно определить только по значениям целевой функции в пройденных точках, то во время поиска непрерывно приходится решать, сколько усилий затратить на изучение области и сколько — на движение по градиенту. В зависимости от соотношения пробных и рабочих шагов различают несколько разновидностей градиентных методов.

Метод наискорейшего спуска. По этому методу движение по направлению градиента продолжается до достижения условного экстремума на этом направлении или до достижения границы допустимой области (рис. 3-8). Метод разработан Л. В. Канторовичем в

1947 г. Отметим, что метод наискорейшего спуска приводит к решению за большее число шагов, зато в среднем требует меньшего времени на точку. В зависимости от соотношения трудоемкости вычисления градиента и ограничений может оказаться выгоднее тот или иной метод. Если вычисление ограничений занимает большое время, а вычисление целевой функции несложно, то предпочтительнее градиентный метод.

С другой стороны, в методе наискорейшего спуска движение по направлению градиента аналогично одномерному поиску, для которого часто применимы регулярные методы (метод дихотомии, метод Фибоначчи, метод золотого сечения). Особенно удачен случай, если по нескольким экспериментам возможна удовлетворительная аппроксимация поведения целевой функции аналитическим выражением.

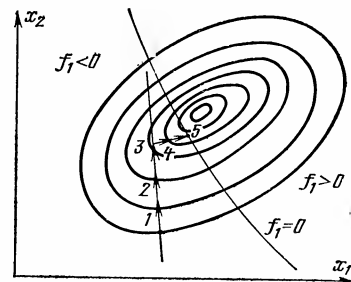


Рис. 3-8. Метод наискорейшего спуска.

ж) Методы поиска при наличии ограничений

Проекционный градиентный метод Зойтендейка. Сущность метода состоит в движении по плоскости, касательной к поверхности ограничения. На эту плоскость проектируется градиент целевой функции и движение осуществляется по направлению этой проекции.

Метод зигзагообразного движения вдоль ограничения. При переходе точки в недопустимую область необходимо вернуться в область R . Наиболее просто и целесообразно возвращение осуществить по градиенту ограничения. Затем снова следует один или несколько шагов по градиенту целевой функции. При этом происходит смещение поисковой точки в сторону оптимума. Зигзагообразное движение прекращается при совпадении направлений градиентов целевой функции и ограничений.

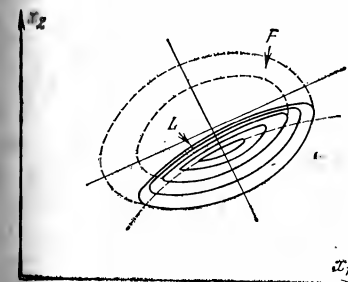


Рис. 3-9. Линии уровня целевой и штрафной функции.

Метод штрафных функций. Характерной чертой метода является преобразование задачи нелинейного программирования при наличии ограничений в одну эквивалентную исходной задачу без ограничений либо в эквивалентную последовательность задач без ограничений, что позволяет осуществлять минимизацию с помощью более простых алгоритмов.

По этому методу исходная целевая функция дополняется штрафами, пропорциональными

степени проникновения в недопустимую область. Штрафная функция $L(x)$ в общем виде:

$$L(x) = F(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_j H(f_j(x)) + \sum_{j=m+1}^p \lambda_j G(g_j(x)). \quad (3-22)$$

Значение штрафа λ_j должно быть достаточно большим, чтобы не допустить существенного углубления в недопустимую область. На рис. 3-9 изображена деформация линий уровней функции L по сравнению с функцией F .

Разновидностью метода штрафных функций является метод Эрроу — Гурвица, согласно которому штраф вводится не только при нарушении ограничений, но и в допустимой области в зависимости от степени приближения к ее границе.

3) Локальные методы случайного поиска

Методы случайного поиска отличаются простотой реализации алгоритмов. В простейшем случае из некоторой точки выполняются пробные шаги в нескольких равновероятных направлениях. Шаги, заканчивающиеся в недопустимой области, отбрасываются. Более эффективным приемом является поиск по статистическому градиенту. Особенностью и достоинством метода статистического градиента является возможность делать меньшее число шагов, чем по регулярному градиентному методу. При увеличении числа независимых переменных затраты времени на случайный поиск возрастают в меньшей степени, чем при градиентном методе. Можно считать, что при числе независимых переменных, большем четырех, метод статистического градиента эффективнее градиентного метода.

Случайный поиск с самообучением. По этому методу информация о поведении целевой функции в предыдущих точках используется для определения направления следующего шага. Пробные шаги перестают быть равновероятными: вероятность более удачного направления увеличивается, менее удачного — уменьшается. Существует несколько алгоритмов самообучения. Один из них реализован в программе оптимального проектирования асинхронных двигателей [25].

В программах, использующих случайные методы, обычно предусматривают две процедуры: во-первых, при заданном числе пробных точек определяется конус предпочтительных направлений; во-вторых, производится корректировка движения с помощью дополнительных пробных шагов. Предпочтительные направления определяются с доверительной вероятностью. Точность определения направления возрастает при увеличении числа пробных шагов.

Для современных программ оптимального проектирования характерно сочетание нескольких методов, которые попеременно включаются в работу в зависимости от поведения целевой функции и этапа поиска. При крутом восхождении в начальной стадии поиска достаточно использовать простую статистическую оценку вдоль случайного направления. Эта оценка имеет большую дисперсию, но на начальной стадии это не имеет значения. При выходе на существовую криволинейную поверхность используется метод наилучшей слу-

чайной пробы или метод статистического градиента. Метод наилучшей случайной пробы состоит в проведении серии пробных шагов, из которых выбирается наилучший. Иногда используют и наихудшие шаги, при этом поиск продолжается в направлении, противоположном наихудшему шагу. При выходе в окрестность экстремума используется один из градиентных методов.

В последнее время для уменьшения дисперсии ошибки случайные пробные шаги заменяют шагами, вычисленными на основе теории планирования экспериментов. Шаги при этом располагаются некоторым определенным образом, минимизирующим дисперсию ошибки. При поиске оптимума по результатам расчетов в пробных точках целевая функция в окрестности центра планирования аппроксимируется линейным или квадратичным полиномом. Дальнейший поиск проводится в направлении градиента этого полинома. Планирование эксперимента позволяет уменьшить число пробных точек по сравнению с методом градиента.

3-4. АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Здесь рассмотрено влияние на технико-экономические показатели оптимального двигателя интенсивности и экстенсивности его использования, а также ряда исходных данных. В качестве целевой функции взято выражение (3-4). В [6] исследовалось влияние нормативного срока окупаемости T_n и расчетного коэффициента загрузки по мощности ξ на технико-экономические показатели двигателя. Установлено, что значение T_n не оказывает существенного влияния на расход материалов и энергетические показатели оптимального двигателя. Значительно сильнее зависимость показателей двигателя от коэффициента загрузки ξ . Так, при номинальной мощности двигателя 16 кВт изменение коэффициента загрузки с 0,4 до 1,0 влечет за собой увеличение расхода стали на 45%, меди — на 22%, а к. п. д. при частичной нагрузке 0,6 P_2 меняется сравнительно мало.

Расчетное число часов работы в год t должно оказывать не меньшее влияние, чем коэффициент загрузки, поэтому было проведено исследование влияния значения t на технико-экономические показатели оптимального двигателя. Такое исследование представляется весьма важным, так как диапазон изменения продолжительности работы двигателя в году больше диапазона изменения коэффициента загрузки.

Если число часов работы в году t увеличится, то при неизменных условиях линейно увеличится C_a [(см. 13-24)].

При изменении затрат на активные потери энергии алгоритм оптимального проектирования будет стремиться так изменить геометрию и, следовательно, производственную себестоимость двигателя C_d , чтобы изменение обобщенных затрат было оптимальным. Поэтому начнется движение оптимальной точки в сторону уменьшения C_a , а именно начнет увеличиваться к. п. д. за счет увеличения расхода материалов. Таким образом, при нарушении баланса в одной из составляющих целевой функции изменения коснутся обеих составляющих. Обе они изменятся в одну сторону (в нашем случае увеличатся). Общее изменение целевой функции невелико вследствие ее пологости, но при больших объемах выпуска такими изменениями пренебрегать нельзя.

Поэтому при оптимальном проектировании важно знать действительное число часов работы в году и коэффициент загрузки двигателя.

При проектировании серий АО2 и 4А коэффициент загрузки принимался равным соответственно 0,6 и 0,7, а годовое число часов работы 1670 и 1500 для всех двигателей. Распределение машин по мощности и степень их использования в каждой отрасли народного хозяйства существенно связаны с технологией, принятой в отрасли, и поэтому незначительно изменяются во времени. Это обстоятельство обуславливает возможность вычис-

Таблица 3-1

Отрасли промышленности	Установленная мощность, млн. кВт	Номинальная мощность, кВт						Итого
		до 0,75	0,75—3	3—11	11—45	45—100	Свыше 100	
Черная металлургия	31,7	0,075	0,671	1,572	3,655	2,675	6,332	14,97
Химическая	30,6	0,157	0,714	0,964	3,518	2,967	6,127	14,45
Нефтеперерабатывающая	4,4	0,006	0,033	0,083	0,247	0,254	1,458	2,08
Цветная металлургия	26,0	0,048	0,449	1,238	3,157	2,340	5,045	12,28
Энергетика	22,6	0,052	0,192	0,636	1,034	1,111	7,645	10,67
Угольная	13,3	0,003	0,037	0,150	0,607	0,816	4,68	6,28
Машиностроение и металлообработка	40,0	0,945	2,104	3,455	5,328	2,586	4,561	18,89
Легкая	6,4	0,222	0,671	0,865	0,830	0,206	3,00	9,41
Пищевая	20,0	0,241	1,130	2,34	3,72	1,509	0,500	9,41
Строительных материалов	16,8	0,191	0,576	0,821	3,14	1,098	3,116	7,91
Итого	211,8	1,94	6,58	12,12	25,14	15,55	38,67	100,00

Таблица 3-2

Отрасли промышленности	Номинальная мощность, кВт						В среднем по отрасли
	до 0,75	0,75—3	3—11	11—45	45—100	свыше 100	
Черная металлургия	991	1075	1179	1281	1414	1579	1402
Химическая	1675	1817	1993	2167	2392	2771	2379
Нефтедобывающая	1662	1803	1977	2149	2372	2650	2504
Цветная металлургия	1190	1291	1416	1539	1698	1897	1687
Энергетика	1725	1871	2053	2231	2463	2751	2600
Угольная	876	950	1043	1133	1251	1397	1326
Машиностроение и металлообработка	597	647	710	771	852	951	787
Легкая	831	901	989	1075	1186	1325	1023
Пищевая	886	961	1055	1146	1265	1413	1112
Строительных материалов	1073	1164	1277	1388	1532	1711	1460
Вся промышленность в среднем	841	988	1176	1364	1631	1989	1564

лять и прогнозировать продолжительность использования двигателей по текущим данным ЦСУ о выпуске продукции по отраслям и средней продолжительности работы электродвигателей в отрасли.

В табл. 3-1 приведено (в процентах) распределение установленной мощности асинхронных двигателей по отраслям промышленности, а в табл. 3-2 — продолжительность (в часах) их работы по данным на 1970 г. Уравнение регрессии средней для всей промышленности продолжительности работы в году, τ , на номинальную мощность двигателя, кВт,

$$\tau = 545 + 376 \sqrt[4]{P_2}. \quad (3-23)$$

С помощью ЭВМ было исследовано влияние числа часов работы на технико-экономические показатели оптимального двигателя. В табл. 3-3 приведены результаты расчетов при фактическом числе часов работы по

(3-23) и продолжительности, равной 1500 ч. Стоимость потерь C_a в обоих случаях вычислялась при фактическом числе часов работы (3-23). Как следует из табл. 3-3, увеличение расхождения между расчетной и фактической продолжительностью работы двигателя влечет за собой увеличение приведенных суммарных затрат.

Таблица 3-3

	Номинальная мощность P_2 , кВт	Продолжительность работы в году t , ч	Масса меди $G_{м1}$, кг	Длина сердечника l_1 , мм	к. п. д., %	Коэффициент мощности $\cos \phi$	Превышение температуры обмотки $\Delta\Theta_{м1}$, °C	Производственная себестоимость двигателя C_d , руб.	Стоимость активных потерь C_a , руб.	Суммарные затраты $З_T$, руб.
0,15	1500 600	1500 600	0,505 0,384	55,7 49,1	58,2 51,0	0,740 0,725	50,1 78,7	9,56 8,30	2,98 4,34	19,80 19,16
0,34	1500 710	1500 710	0,694 0,548	66,5 60,3	66,0 61,3	0,756 0,745	61,7 85,8	12,10 10,78	5,32 6,83	26,88 26,34
0,71	1500 800	1500 800	0,962 0,806	73,6 68,5	71,4 68,6	0,787 0,782	75,2 96,2	15,71 14,46	9,08 10,40	37,28 36,66
1,4	1500 1040	1500 1040	1,358 1,267	91,7 80,9	76,4 73,9	0,869 0,865	78,9 106,8	21,46 19,93	16,97 18,68	55,19 54,28
2,8	1500 1090	1500 1090	1,886 1,808	105,0 103,6	79,3 79,3	0,884 0,879	108,8 110,0	28,58 28,08	23,73 30,34	80,41 80,40
5,6	1500 1270	1500 1270	3,13 3,00	104,3 103,3	83,5 83,9	0,896 0,896	108,1 110	44,13 43,49	56,24 55,32	134,05 132,13
7,5	1500 1270	1500 1270	4,030 4,050	93,1 92,5	85,7 85,3	0,891 1,893	110 110	58,01 56,42	69,14 69,20	170,78 168,73
7,5	1500 2170	1500 2170	4,050 4,45	92,5 94,9	85,3 85,9	0,893 0,893	110 100,6	56,42 58,46	119,07 115,01	221,64 217,90
13	1500 2620	1500 2620	6,446 7,758	95,3 106,3	86,4 88,4	0,907 0,907	110 78,2	85,75 93,82	227,12 210,88	376,80 375,14

На технико-экономические показатели двигателей значительное влияние оказывают следующие исходные данные проектирования: кривая намагничивания (B_{2500}), удельные потери в электротехнической стали $p_{1,0/50}$, коэффициент заполнения паза k_3 , допустимое превышение температуры обмотки статора $\Delta\Theta_{м1}$. Для количественной оценки степени влияния используют коэффициенты влияния. Коэффициентом влияния входного параметра

Таблица 3-4

Выходной параметр	Исходный параметр	Средний коэффициент влияния	Регрессия коэффициента влияния на логарифм мощности	Коэффициент корреляции	Диапазон мощностей, кВт, в котором справедливо уравнение регрессии
$З_T$	B_{2500}	-0,21	$-0,33+0,12 \lg P_2$	-0,955	1—50
	$p_{1,0/50}$	0,096	$0,086-0,013 \lg P_2$	0,53	0,5—50
	k_3	-0,12	$-0,13-0,02 \lg P_2$	-0,74	1—100
C_d	$\Delta\Theta_{м1}$	-0,076	$-0,063 \lg P_2$	-0,92	2—100
	B_{2500}	-0,32	—	—	1—50
	$p_{1,0/50}$	0,1	—	—	0,5—50
l_1	k_3	-0,19	—	—	1—100
	$\Delta\Theta_{м1}$	-0,29	—	—	2—100
$m_{м1}$	B_{2500}	-0,66	—	—	0,25—100
	$p_{1,0/50}$	0,12	—	—	0,25—100
	k_3	-0,41	—	—	0,25—50
η	$\Delta\Theta_{м1}$	-0,56	$-0,19-0,2 \lg P_2$	-0,71	2—100
	B_{2500}	-0,17	—	—	0,25—100
	$p_{1,0/50}$	0,24	—	—	0,5—100
η	k_3	0,075	—	—	1—100
	$\Delta\Theta_{м1}$	-0,16	—	—	2—100
η	B_{2500}	0,113	$0,197-0,113 \lg P_2$	-0,78	0,5—50
	$p_{1,0/50}$	—	—	—	—
	k_3	—	—	—	—
η	$\Delta\Theta_{м1}$	-0,052	$-0,102+0,46 \lg P_2$	-0,99	2—50

на функцию называется приращение функции в процентах, вызванное изменением параметра на один процент.

В табл. 3-4 представлены коэффициенты влияния указанных выше исходных данных проектирования на суммарные затраты $З_T$, производственную себестоимость двигателя, C_d , длину сердечника l_1 , массу обмоточного провода $m_{м1}$, к. п. д. при номинальной нагрузке η .

Полученные коэффициенты влияния могут быть использованы для составления уравнения баланса целевой функции, отдельных ее составляющих, лимитеров,

а также важнейших параметров и размеров двигателей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z_T &= k_{11} \Delta B_{2500} + k_{12} \Delta p_{1,0/50} + k_{13} \Delta k_3 + \\ &\quad + k_{14} \Delta (\Delta \Theta_{M1}); \\ \Delta C_d &= k_{21} \Delta B_{2500} + k_{22} \Delta p_{1,0/50} + k_{23} \Delta k_3 + \\ &\quad + k_{24} \Delta (\Delta \Theta_{M1}); \\ \Delta l_1 &= k_{31} \Delta B_{2500} + k_{32} \Delta p_{1,0/50} + k_{33} \Delta k_3 + k_{34} \Delta (\Delta \Theta_{M1}); \\ m_{m1} &= k_{41} \Delta B_{2500} + k_{42} \Delta p_{1,0/50} + k_{43} \Delta k_3 + \\ &\quad + k_{44} \Delta (\Delta \Theta_{M1}); \\ \Delta \eta &= k_{51} \Delta B_{2500} + k_{52} \Delta p_{1,0/50} + k_{53} \Delta k_3 + \\ &\quad + k_{54} \Delta (\Delta \Theta_{M1}). \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

С точки зрения уравнений баланса проектирование двигателя новой серии приобретает следующий смысл. В исходном двигателе, т.е. в двигателе старой серии, все отклонения равны нулю и левые части системы уравнений (3-24) равны нулю. Задача создания нового двигателя возникает тогда, когда какая-либо переменная правой части получает приращение: изменяется номинальная мощность, свойства электротехнической стали, свойства изоляционных материалов, цена на материалы и т.п. При этом нарушается баланс во всех уравнениях, в которые данная переменная входит с ненулевым коэффициентом влияния. Задача проектировщика сводится к тому, что он должен изыскать возможность восстановить нарушенный баланс, придавая приращения остальным переменным и при этом стараясь добиться максимального отрицательного приращения суммарных затрат. Таким образом можно найти, насколько возможно изменить длину сердечника, увеличить или уменьшить запас температуры и т.п.

Например, для двигателя мощностью 1 кВт получается следующее уравнение для приращения длины:

$$\Delta l_1 = -0,66 \Delta B_{2500} + 0,12 \Delta p_{1,0/50} + 0,41 \Delta k_3. \quad (3-25)$$

Составляющая $-0,56 \Delta \Theta$ в уравнение не входит, так как влияние температуры как лимитера начинается только с мощности 2 кВт.

Первое уравнение системы (3-24) может быть использовано для расчета лимитных цен на новые мате-

риалы, т.е. таких цен, которые в сочетании с новыми свойствами материалов дают нулевое приращение целевой функции. Влияние одних исходных данных постоянно по всему диапазону мощностей, влияние других — изменяется при изменении номинальной мощности двигателя. С помощью приведенных в табл. 3-4 уравнений регрессии легко установить границы эффективного применения тех или иных мероприятий.

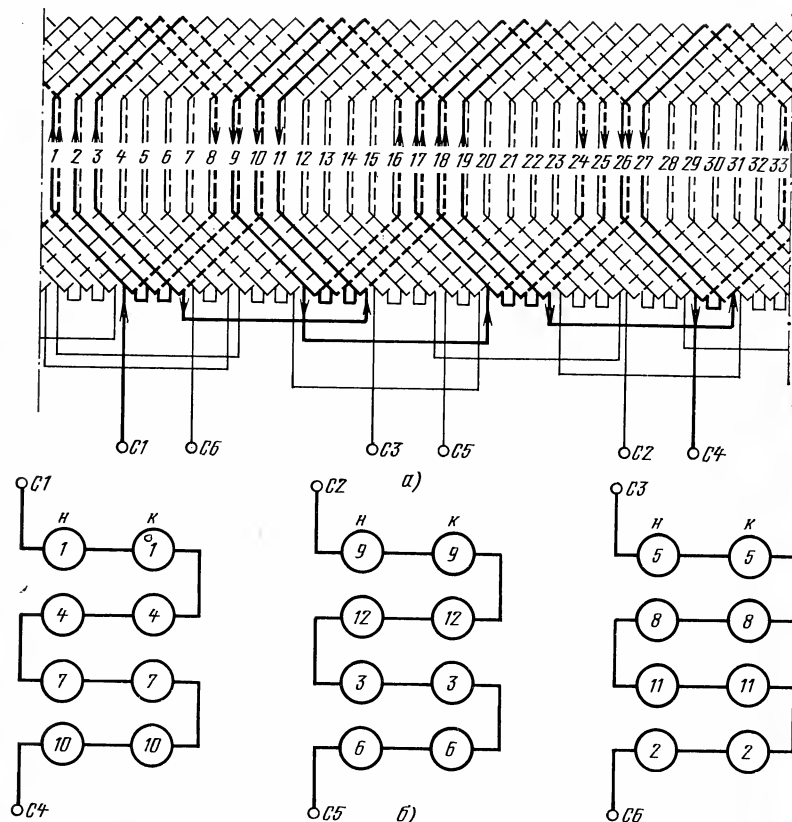
Глава четвертая

ОБМОТКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Два проводника, расположенные в пазах, отстоящих друг от друга на шаг y и соединенные между собой, образуют простейший контур-виток. Каждый виток может состоять из нескольких параллельных (элементарных) проводников. Совокупность последовательно соединенных витков, уложенных в одну и ту же пару пазов, образует катушку (или секцию). Проводники катушки, лежащие в одном и том же пазу, называются стороной катушки. Расстояние между сторонами катушки называется шагом обмотки y и выражается в долях полюсного деления или в зубцовых делениях.

Шаг y , равный полюсному делению τ , называется диаметральной или полным ($y=\tau$). Если $y<\tau$, шаг укороченный, если $y>\tau$, шаг удлиненный; разность $\tau-y$ называется укорочением. В относительных единицах шаг равен y/τ , а укорочение $1-y/\tau$. Совокупность катушек одной и той же фазы, расположенных в соседних пазах и соединенных последовательно, образует катушечную группу. Соединенные последовательно, параллельно или последовательно-параллельно катушечные группы образуют обмотку фазы. В трехфазной обмотке обмотки фаз соединяются в треугольник (Δ) или звезду (Y). Расположенные в соседних пазах стороны катушек одной катушечной группы занимают q зубцовых делений и образуют фазную зону с углом α , равным $2\pi pq/z$. Трехфазные обмотки выполняются с



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

в)

фазными зонами $\alpha = \pi/3$ (шестизонные обмотки) и $\alpha = 2\pi/3$ (трехзонные обмотки).

Для шестизонных обмоток q определяется выражением

$$q = z/2p \cdot 3$$

и представляет собой число пазов, приходящихся на полюс и фазу. Как правило, обмотки выполняются с

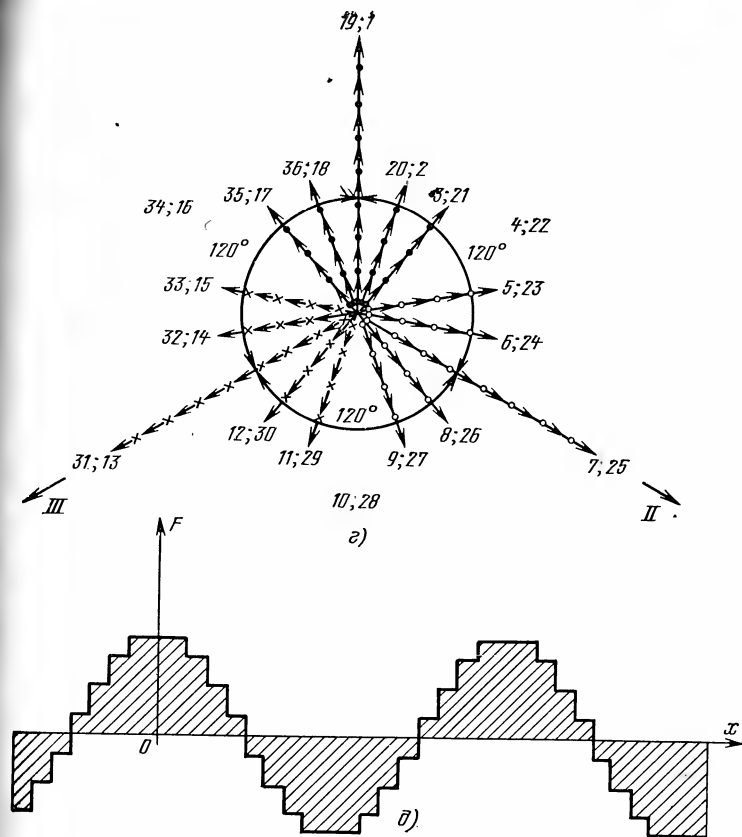


Рис. 4-1. Двухслойная обмотка $2p=4$; $z_1=36$, $q=3$, $y=7$, $a=1$.

а — развернутая схема; б — схема соединения катушечных групп; в — торцевая схема; г — звезда пазовых Э. Д. С.; д — кривая м. д. с.

целым числом пазов на полюс и фазу. При q , равном дробному числу, фазные зоны только в среднем равны $\pi/3$ или $2\pi/3$, фактически же часть зон меньше, а часть — больше $\pi/3$ или $2\pi/3$.

4-2. СХЕМЫ ОБМОТОК

Расположение сторон катушек в пазах сердечника, соединение катушек, катушечных групп и обмоток фаз изображают условно на схеме обмотки. Иногда схему дополняют таблицей. Схемой руководствуются при укладке катушек, монтаже соединений и выводных концов и при ремонте. Одновременно схема обмотки используется

для анализа ее свойств, в частности для проверки ее симметричности, для построения кривой м. д. с., звезды пазовых э. д. с., для расчета обмоточного коэффициента основной и высших гармоник. Применяются развернутая схема, схема соединений катушечных групп, монтажная схема соединений, торцевая схема с таблицей обмотки.

В схемах приняты следующие обозначения:

Стороны катушек обмоток фаз I, II и III соответственно	●, ○, ×
Начало и конец катушечной группы соответственно	н, к,
Начала обмоток фаз	C1, C2, C3
Концы обмоток фаз	C4, C5, C6

а) Развернутая схема

Схема в условном виде представляет собой развертку на внутренней поверхности статора (рис. 4-1, а). Стороны катушек, уложенных в пазы, изображаются при однослойных обмотках сплошными прямыми линиями, а при двухслойных — двумя рядом расположенными прямыми линиями: сплошной (сторона катушки, уложенная в верхнюю часть паза) и пунктирной (сторона катушки, уложенная на дно паза). Соответственно изображаются лобовые части, а также соединения катушек и катушечных групп между собой, начала и концы обмоток фаз. Стрелки на элементах обмотки показывают направление э. д. с. или токов в определенный момент времени.

б) Схема соединения катушечных групп

Каждая катушечная группа условно изображается двумя окружностями (начало и конец группы), соединенными горизонтальной чертой. В окружностях пишутся номера катушечных групп в порядке их расположения по внутренней поверхности статора. Соединение катушечных групп между собой и выводы обмоток фаз изображаются прямыми линиями (рис. 4-1, б).

в) Торцевая схема

На торцевой схеме показано расположение катушечных сторон в пазах, их принадлежность к той или иной обмотке фазы и направление тока в данной стороне катушки в определенный момент времени. Если отрезать лобовые части статорной обмотки и развернуть зубцовый слой статора на плоскость, то схема представит собой вид с торца на этот зубцовый слой (рис. 4-1, в). На торцевой схеме каждый паз изображается отдельной клеткой, которой присваивается порядковый номер паза. В этой клетке условным знаком (●, ○, ×) представлена сторона катушки, а направление тока в ней указывается знаком (+ или —) над клеткой. При двухслойной обмотке в каждой клетке записываются два условных знака, соответствующие сторонам катушек нижнего и верхнего слоя, а направление тока указывается соответственно над и под клеткой, изобража-

ющей паз (рис. 4-1, б). Так как соединения катушек в катушечные группы и последних в обмотку фазы на торцевой схеме не показаны, то при необходимости к ней прикладывают таблицу соединения катушек. В этой таблице каждая катушка обозначается номерами двух пазов (через тире), в которых расположены ее стороны. Обозначение одной катушки от обозначения соединенной с ней последовательно другой отделяется запятой. В таблицах двухслойных обмоток стороны верхнего слоя обозначены номером паза, стороны нижнего слоя — номером паза со штрихом наверху.

4-3. СПОСОБЫ АНАЛИЗА СВОЙСТВ ОБМОТОК

При анализе свойств обмоток приняты следующие положения:

1) все витки выполнены из одинарных проводников, сечение которых равно сумме сечений элементарных проводников;

2) все катушки равновитковые. При разновитковых катушках число витков в катушке усредняется. Это позволяет в качестве единичного параметра принимать сторону катушки;

3) так как форма кривой м. д. с., звезда пазовых э. д. с., обмоточный коэффициент не зависят от того, выполнены ли обмотки с последовательным соединением катушечных групп или содержат параллельные ветви, то при анализе принято, что обмотки не содержат параллельных ветвей;

4) так как сумма векторов не зависит от порядка их сложения, то при анализе действительный порядок соединения катушечных сторон катушек и катушечных групп можно заменить эквивалентным при условии сохранения неизменными по величине и по фазе токов и э. д. с. во всех элементах обмотки.

а) Построение звезды пазовых э. д. с.

Построение звезды пазовых э. д. с. основано на следующем:

1) каждое двойное полюсное деление составляет 2π рад и графически представляется полной окружностью, на которой размещается z/p пазовых делений с центральным углом $\gamma = 2\pi p/z$;

2) э. д. с., наведенная в каждой катушечной стороне синусоидальным магнитным полем, может быть представлена единичным вектором, проходящим через ось паза и центр окружности.

Таким образом, звезда векторов пазовых э. д. с. должна состоять из z лучей, сдвинутых между собой на угол γ .

При q , равном целому числу, для построения звезды пазовых э. д. с. достаточно построить z/p лучей и пронумеровать последовательно по числу пазов. При этом каждому лучу будет соответствовать p пазов (рис. 4-1, г). Отмечая на соответствующих лучах звезды условным знаком фаз (●, ○, ×) э. д. с. каждой катушечной стороны, получим диаграмму векторов э. д. с. Длина каждого вектора (в условных единицах) определяется числом знаков фазы (числом единичных векторов), помеченных на нем. Ось симметрии группы векторов данной фазы совпадает с направлением результирующего вектора э. д. с. Сумма проекций всех векторов группы на результирующий вектор представляет собой геометрическую сумму векторов, их арифметическая сумма равна числу единичных векторов группы, а отношение этих сумм — общему обмоточному коэффициенту $k_{об1}$ для основной гармоники. Обмоточный коэффициент для ν -й гармоники поля определяется аналогично, но при этом сле-

дует иметь в виду, что угол γ между векторами пазовых э. д. с. увеличивается в ν раз.

Расчет результирующего вектора э. д. с. упрощается, если двухслойную обмотку заменить двумя последовательно соединенными однослойными диаметрально обмотками с половинным числом витков, смещенными относительно друг друга на угол $(1 - 2py/z)\pi$. Результирующая э. д. с. равна удвоенной э. д. с. эквивалентной одно-

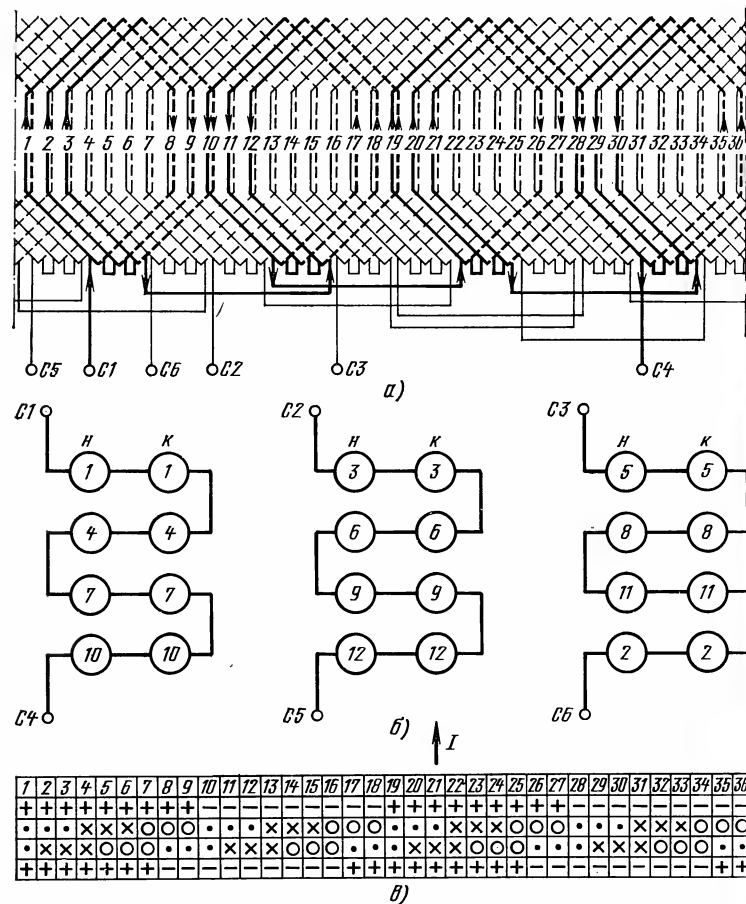


Рис. 4-2. Двухслойная обмотка $2p=4$; $z=33$; $q=2\frac{3}{4}$; $y=7$; $a=1$.

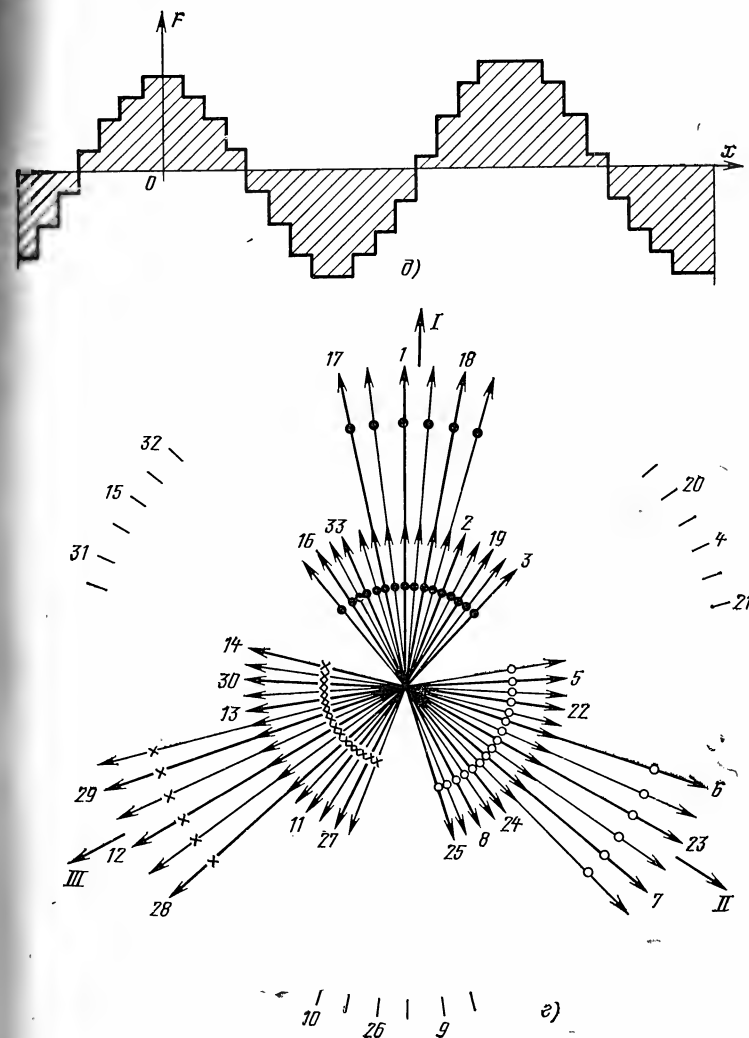
а — развернутая схема; б — схема соединения катушечных групп; в — торцевая схема; д — кривая м. д. с.; г — звезда пазовых э. д. с.

слойной обмотки, умноженной на коэффициент укорочения, равный:

$$k_{\nu} = \cos \left(1 - \frac{2py}{z} \nu \right) \frac{\pi}{2} = \sin \frac{2py}{z} \nu \frac{\pi}{2} = \sin \frac{y}{\tau} \nu \frac{\pi}{2}. \quad (4-1)$$

Все сказанное выше справедливо и для обмоток с дробным q (рис 4-2, а—д), но в этом случае число лучей звезды пазовых э. д. с. равно:

$$n_{\pi} = tz/p,$$



где $t=1, 2, \dots, p$, причем t должно принимать наименьшее значение, при котором n_t — целое число ($t=1$ при целых q).

б) Построение кривой м. д. с.

Хотя форма кривой м. д. с. для различных моментов времени в общем случае не остается одной и той же, обычно ограничиваются ее построением только для одного момента времени. Проще всего строить ее для $\omega t = \pi/3$.

В этот момент токи фаз равны:

$$i_I = i_{II} = I_m/2; \quad i_{III} = -I_m.$$

Так как выше было принято, что все катушки равновитковые, то м. д. с. катушек фаз I и II могут быть представлены 0,5 условной единицы, а фазы III — одной условной единицей в принятом масштабе м. д. с. На торцевой схеме указаны принадлежность катушечной стороны к соответствующей фазе и направление тока в ней. Выбрав масштаб м. д. с. и приняв любую катушечную сторону за начало, можно построить кривую м. д. с., положив, что в середине паза кривая изменяется скачком на значение полного тока катушки. Приращение или уменьшение м. д. с. определяется направлением тока катушки. После построения кривой м. д. с. проводится средняя линия так, чтобы суммарные площади прямоугольников над ней и под ней были равными (рис. 4-1, б, 4-2, б). Разложив кривую м. д. с. в ряд Фурье, можно выделить основную и высшие гармоники кривой м. д. с. и поля (считая поле пропорциональным м. д. с.).

4.4. СВОЙСТВА СИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК

Трехфазная обмотка симметрична, если э. д. с., индуктируемые в обмотках фаз, равны по значению и смещены относительно друг друга на угол $2\pi/3$. Это осуществимо при одинаковом числе витков в обмотках фаз и при таком размещении катушек, когда каждой катушке одной фазы (I) в двух других фазах (II, III) соответствуют такие же катушки, смещенные в пространстве на углы:

$$\beta_{II} = (3k_1 + 1) \frac{2}{3} \pi; \quad \beta_{III} = (3k_2 + 2) \frac{2}{3} \pi,$$

где k_1 и k_2 — нуль или целое число.

Такое размещение катушек осуществимо при q , равном целому числу, а при дробном q — только при соблюдении правил образования симметричных дробных обмоток, вытекающих из звезды пазовых э. д. с.

Для симметричных обмоток нет необходимости в построении звезды пазовых э. д. с. и кривой м. д. с. Порядки и обмоточные коэффициенты гармонических со-

ставляющих могут быть определены из приведенных ниже формул.

Кривая м. д. с. шестизонной обмотки с целым q (рис. 4-1, а) содержит только нечетные гармоники v :

$$v = 6k_1 + 1, \quad (4-2)$$

где k_1 — любое целое положительное или отрицательное число, включая нуль.

Коэффициент распределения k_{pv} для этих гармоник равен:

$$k_{pv} = \frac{\sin(v\pi/6)}{q \sin(v\pi/6q)}, \quad (4-3)$$

а обмоточный коэффициент $k_{обv}$:

$$k_{обv} = k_{pv} k_{yv}, \quad (4-4)$$

где k_{yv} определяется по (4-1).

Кривая м. д. с. трехзонной обмотки с целым q содержит гармоники v , порядок которых определяется выражением

$$v = 3k_1 + 1. \quad (4-5)$$

Коэффициент распределения для этих гармоник равен:

$$k_{pv} = \frac{\sin(v\pi/3)}{2q \sin(v\pi/6q)}, \quad (4-6)$$

а $k_{обv}$ определяется по (4-4).

При диаметральных трехзонных обмотках для четных гармоник $k_{yv} = 0$ и кривая м. д. с. содержит только нечетные гармоники v , определяемые (4-2).

Отношение коэффициентов распределения для 1-й гармоники при трехзонной ($2\pi/3$) и шестизонной ($\pi/3$) обмотках и одинаковом числе пазов:

$$\frac{k_{p1(2\pi/3)}}{k_{p1(\pi/3)}} = \frac{\sin(\pi/3)}{2 \sin(\pi/6)} = \cos(\pi/6) = 0,865,$$

т. е. при переходе с зоны в $2\pi/3$ рад на зону в $\pi/3$ рад обмоточный коэффициент распределения увеличивается в 1,15 раза. Соответственно увеличивается и эффективное число витков в обмотке фазы. Таким образом, для трехфазных двигателей наимыгоднейшей является фазная зона в $\pi/3$ рад. С фазной зоной $2\pi/3$ рад выполняются только однообмоточные двухскоростные двигатели и двигатели с $q=0,5$.

В случае симметричных дробных шестизонных обмоток в кривой м. д. с. (рис. 4-2, з) возникают гармоники порядка

$$\nu = 6k_1/d + 1, \quad (4-7)$$

где d определяется из условия $q = c/d$ — несократимая дробь.

Обмоточные коэффициенты для этих гармоник могут быть найдены по [41].

Несимметричность обмоток влечет за собой ухудшение свойств асинхронных машин, и поэтому несимметричные обмотки с дробным q следует применять только в действительно необходимых случаях, когда это выгодно с точки зрения унификации листов статора при разных числах полюсов. Допустимость применения таких обмоток можно установить путем разложения кривой м. д. с. в ряд Фурье и разложения диаграммы векторов э. д. с. на прямую, обратную и нулевую последовательности, пользуясь методом симметричных составляющих.

Для одно-двухслойных и двухслойных обмоток, укладываемых механизированным способом (см. § 4-5), дополнительным условием симметрии является равенство числа катушек, лежащих в верхнем и нижнем слое, для каждой обмотки фазы.

Несоблюдение этого условия приводит к разному индуктивному сопротивлению обмоток фаз, что, в свою очередь, вызывает несимметрию токов по фазам при соединении обмоток в звезду или уравнильные токи при соединении обмоток в треугольник и дополнительный нагрев обмоток.

4-5. СТАТОРНЫЕ ОБМОТКИ

Статорные обмотки асинхронных двигателей выполняются только петлевыми.

По виду катушек обмотки подразделяются на всыпные обмотки с мягкими катушками и обмотки с жесткими катушками или полукатушками. Мягкие катушки изготавливаются из круглого медного или алюминиевого провода. Такие катушки наматываются на шаблоны, где им придается предварительная форма, и затем укладываются в предварительно изолированные трапециевидные пазы. После укладки катушек и закрепле-

ния их в пазах с помощью клиньев или крышек производится формовка лобовых частей и бандажирование. Междофазовые изоляционные прокладки устанавливаются в процессе укладки обмоток. Обмотанный таким образом статор подвергается пропитке. Весь процесс приготовления всыпных обмоток может быть полностью механизирован.

Жесткие катушки (или полукатушки) изготавливаются из прямоугольного изолированного провода. Окончательная форма придается катушкам до укладки. Корпусная и междофазовая изоляции частично напояются непосредственно на катушки, которые затем либо пропитываются или компаундируются, либо склеиваются до укладки в пазы. После этого катушки укладываются в полуоткрытые или открытые предварительно изолированные пазы статора, закрепляются и подвергаются окончательной пропитке.

Всыпные обмотки имеют следующие преимущества перед обмотками с жесткими катушками:

- 1) возможность полной механизации всего процесса изготовления;
- 2) меньшая длина и вылет лобовых частей, а следовательно, и меньшие потери, более высокий к. п. д., меньшая длина активной части машины;
- 3) более благоприятная с точки зрения использования зубцовой зоны трапециевидная форма паза;
- 4) меньшее открытие паза, обеспечивающее меньшие пульсации потока в воздушном зазоре, т. е. меньшие добавочные потери и намагничивающий ток;
- 5) большая производственная технологичность: намотка катушечных групп, в ряде случаев и обмоток фаз, производится без разрыва, т. е. меньшее число паяк, возможность укладки обмотки в пазы сердечника без корпуса облегчают и удешевляют обмотку и пропитку.

В силу этих достоинств мягкие всыпные обмотки дешевле и менее трудоемки.

Достоинствами жестких обмоток являются больший коэффициент заполнения за счет применения прямоугольных проводов и большая надежность, связанная с меньшей технологической дефектностью, так как в пазы укладываются готовые изолированные и проверенные катушки, которые подвергаются меньшим деформациям.

В силу указанных преимуществ всыпные обмотки являются предпочтительными для асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В, мощностью до 100 кВт.

Следует также отметить, что прямоугольные провода выпускаются, только начиная с определенных размеров, что делает их применение затруднительным для машин малой и даже средней мощности.

В двигателях мощностью свыше 100 кВт применение всыпных обмоток из круглого провода встречает существенные технологические трудности. Обмотки таких двигателей целесообразно выполнять из жестких катушек. В зарубежной практике встречаются случаи выполнения асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В, мощностью свыше 100 кВт со всыпными обмотками из круглого провода.

По размещению катушек в пазах и расположению их лобовых частей различаются: однослойные (трехплоскостные, двухплоскостные, «вразвалку», цепные); одно-двухслойные и двухслойные (в том числе концентрические) обмотки. Каждая из этих обмоток обладает своими достоинствами и недостатками.

Механизация процесса укладки статорных обмоток асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В — один из важнейших путей повышения производительности труда на электромашиностроительных заводах. Вне зависимости от принципа действия статорообмоточных станков укладываемая обмотка должна быть концентрической и укладываться в пазы статора обеими сторонами одновременно (без «подъема шага»). Второе условие до сих пор было осуществимо только для однослойных обмоток.

Однослойные концентрические обмотки наиболее пригодны для механизированной укладки, но их применение связано с повышенным расходом меди за счет больших вылетов лобовых частей. Кроме того, отсутствие укорочения в этих обмотках приводит к ухудшению формы поля в воздушном зазоре, добавочным потерям, провалам в механической характеристике и магнитному шуму. Учитывая большие технологические преимущества, такие обмотки целесообразно применять в двигателях мощностью до 10 — 15 кВт. При этом необходимо принять меры, ограничивающие упомянутые вредные явления: рациональное сочетание числа пазов статора и ротора, скос пазов и др. [26].

В настоящее время разработано несколько видов одно-двухслойных и двухслойных обмоток, отвечающих требованиям механизированной укладки.

Одно-двухслойные концентрические обмотки сочетают в себе преимущества однослойных (возможность механизированной укладки) и двухслойных (укорочение шага). Однако они более трудоемки, чем однослойные, и поэтому не могут быть рекомендованы для массовых машин малой мощности. Такие обмотки целесообразны для машин мощностью 15 — 100 кВт при $q \leq 6$.

Для двигателя с $q > 6$ (двухполюсные машины при $z_1 = 48$) применение концентрических одно-двухслойных обмоток нецелесообразно из-за чрезмерной длины вылета лобовых частей, размещение которых требует увеличения размеров оболочки машины. Для таких двигателей предпочтительной является двухслойная обмотка без «подъема шага», предназначенная для механизированной укладки. Эта обмотка может быть выполнена «в развалку» — с разделением катушечной группы на две концентрические подгруппы, что существенно уменьшает длину вылета лобовых частей.

Для двигателей мощностью свыше 100 кВт с ручной укладкой рекомендуется двухслойная обмотка.

Для двигателей с одно-двухслойными обмотками шаг обмотки для каждого значения числа пазов на полюс и фазу предопределен заранее самой структурой обмотки. При двухслойных обмотках шаг должен быть равным или близким к 0,8 диаметального. В двухполюсных машинах при больших значениях числа пазов на полюс и фазу ($q > 5$) из технологических соображений шаг принимается равным примерно $\frac{2}{3}$ диаметального.

Не останавливаясь на общеизвестных и многократно описанных однослойной и двухслойной обмотках [27], рассмотрим одно-двухслойные обмотки, двухслойные обмотки без подъема шага и обмотки, у которых $0,5 \leq q \leq 1$.

а) Одно-двухслойная концентрическая обмотка

Каждая обмотка фазы состоит из $2p$ одинаковых катушечных групп. Каждая катушечная группа включает в себя одну большую и $q - 2$ малые катушки. Большая катушка занимает весь паз, малая — только половину. Отсюда и название обмотки — одно-двухслой-

ная. Обмотка применима при $q > 2$; при $q \leq 2$ она превращается в однослойную. Максимальный шаг имеет большая катушка:

$$y_6 = 3q - 1. \quad (4-8)$$

Шаг малых катушек, расположенных концентрически внутри большой, определяется членами ряда:

$$y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{m(q-2)} = (y_6 - 2), (y_6 - 4), \dots, [y_6 - 2(q - 2)]. \quad (4-9)$$

Для расчета средней длины витка, сопротивления обмотки и массы провода следует пользоваться средним шагом:

$$y_{cp} = \frac{2y_6 + y_{m1} + y_{m2} + \dots + y_{m(q-2)}}{q}. \quad (4-10)$$

Для расчета пазового рассеяния и других параметров, связанных с укорочением шага, следует пользоваться эквивалентным шагом, определенным по обмоточному коэффициенту из звезды пазовых э. д. с. Значения шагов катушек, среднего и эквивалентного шагов обмотки, обмоточного коэффициента приведены в табл. 4-1.

Таблица 4-1

q	Число катушек в группе		y ₆	y _м	y _{ср}	k _{об}	y _{эк}	y _{ср} /y _{эк}
	больших	малых						
3	1	1	8	6	7,33	0,945	8	0,916
4	1	2	11	9; 7	9,50	0,925	10	0,950
5	1	3	14	12; 10; 8	11,60	0,912	12	0,967
6	1	4	17	15; 13; 11; 9	13,67	0,898	14	0,977

Из табл. 4-1 видно, что средний шаг меньше эквивалентного и, следовательно, расход обмоточного провода в одно-двухслойных обмотках меньше, чем в двухслойных, где $y_{ср} = y_{эк}$.

На рис. 4-3, а представлена торцевая схема концентрической одно-двухслойной обмотки.

Укладка одно-двухслойных обмоток производится в несколько операций — переходов. Число катушечных групп, укладываемых за один переход, ограничивается

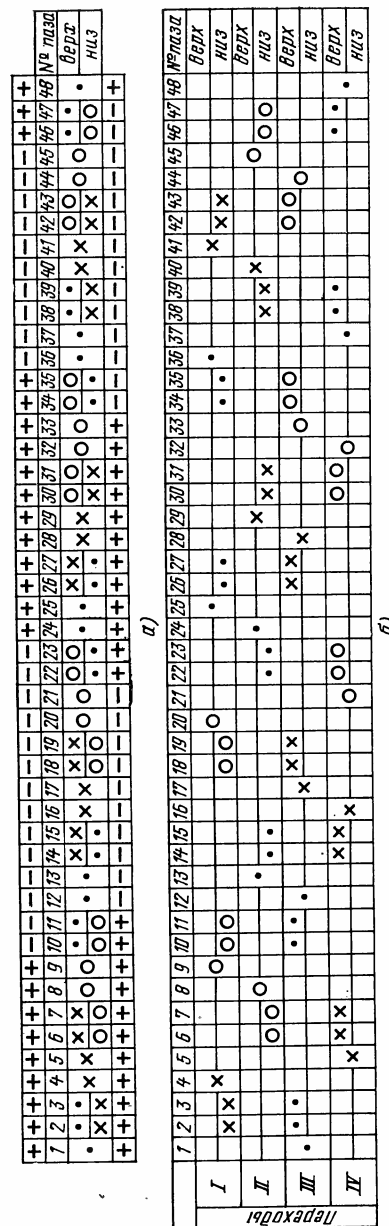


Рис. 4-3. Концентрическая одно-двухслойная обмотка $2p=4$; $z=48$; $q=4$.
а — торцевая схема; б — схема укладки по переходам.

необходимостью установки изоляционных прокладок в пазах и в лобовых частях обмотки.

Для составления схем укладки одно-двухслойных обмоток целесообразно пользоваться алгоритмической записью. Алгоритм укладки записывается в виде двух столбцов. В правом столбце указывается шаг между катушечными группами $y_{к,г}$ и число катушечных групп $n_{к,г}$, укладываемых за один переход. В левом столбце указываются координаты катушечных групп каждого перехода относительно произвольной точки начала отсчета i . Если переходы отличаются между собой по числу катушечных групп и шагу между ними, то как в правом, так и в левом столбцах дополнительно указывается индекс перехода (1 или 2). Шаг между катушечными группами и координаты переходов указываются в пазовых делениях.

Алгоритм укладки одно-двухслойной обмотки при четном числе пар полюсов имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} i \\ i + q \quad y_{к,г} = 4q \\ i + 2q \quad n_{к,г} = 3p/2. \\ i + 3q \end{array} \right\} \quad (4-11)$$

Обмотка укладывается за четыре перехода (рис.4-3, б). При нечетном числе пар полюсов одно-двухслойная обмотка укладывается за пять переходов в соответствии с алгоритмами:

для $p = 1$

$$\left. \begin{array}{l} i \} 1 \\ i + q \} 1 \\ i + 2q \} 2 \\ i + 3q \} 1 \\ i + 4q \} 1 \end{array} \quad \begin{array}{l} n_{к,г} = 1 \} 1 \\ \\ \\ y_{к,г} = 3q \} 2; \\ n_{к,г} = 1 \} 2; \end{array} \right\} \quad (4-12)$$

для $p=3$

$$\left. \begin{array}{l} i \} 1 \\ i + 4q \} 1 \\ i + 2q \} 2 \\ i + q \} 2 \\ i + 3q \} 2 \end{array} \quad \begin{array}{l} y_{к,г} = 3q \} 1 \\ n_{к,г} = 3 \} 1 \\ \\ y_{к,г} = 1 \} 2. \\ n_{к,г} = 6 \} 2. \end{array} \right\} \quad (4-13)$$

б) Двухслойная концентрическая обмотка для механизированной укладки

Двухслойная концентрическая обмотка без «подъема шага» является разновидностью обычной двухслойной и отличается от последней только распределением катушек в слоях и порядком укладки. Параметры обмотки: шаг, обмоточный коэффициент, расход обмоточного провода — такие же, как и у обычной двухслойной.

Укладка двухслойной обмотки без «подъема шага» при четном числе пар полюсов (рис. 4-4) производится по алгоритму соответствующей одно-двухслойной обмотки (4-11).

В двухполюсных машинах ($p=1$) с целью уменьшения вылета лобовых частей каждая катушечная группа разбивается на две равные концентрические подгруппы с числом катушек $q' = q/2$, которые затем соединяются последовательно. Алгоритм укладки такой обмотки имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} i \\ i + 2q' \\ i + 4q' \\ i + 5q' \\ i + 3q' \\ i + q' \end{array} \quad \begin{array}{l} y_{к,г} = 3q' \\ n_{к,г} = 2. \end{array} \right\} \quad (4-14)$$

Алгоритм укладки шестиполюсной обмотки ($p=3$):

$$\left. \begin{array}{l} i \\ i + q' \\ i + 2q' \\ i + 3q' \\ i + 4q' \\ i + 5q' \\ i + 6q' \end{array} \quad \begin{array}{l} y_{к,г} = 6q' \\ n_{к,г} = 3. \end{array} \right\} \quad (4-15)$$

Соединение катушечных групп в параллельные ветви производится таким образом, чтобы число сторон катушек, расположенных в нижнем и верхнем слоях

[illegible]

Рис. 4-4. Двухслойная обмотка без «подъема шага» $2p=4$; $z_1=48$.
 a — торцевая схема; b — схема укладки по переходам.

параллельной ветви, было равно соответствующему числу сторон другой параллельной ветви.

Как показали испытания, свойства двигателей с одноподушечными и двухслойными обмотками без подъема шага такие же, как у двигателей с обычными двухслойными обмотками.

н) Обмотки с $0,5 \leq q \leq 1$

В многополюсных трехфазных асинхронных двигателях малой мощности при малом числе пазов предпочтительны шестизонные однослойные цепные обмотки с $q = 1$.

Если применение обмоток с $q=1$ невозможно, рекомендуются двухслойные трехзонные укороченные ($y=1$) или удлиненные ($y=2$) обмотки с $q=0,5$.

Обмотки с $0,5 \leq q < 1$ допустимы только в случае крайней необходимости.

При $q=1$ порядок гармонических составляющих м. д. с. определяется (4-2), а при $q=0,5$ $v=3k+1$. Обмоточные коэффициенты гармонических составляющих в обоих случаях равны обмоточному коэффициенту основной гармоники.

Наличие высших гармоник обуславливает возникновение добавочных моментов и потерь. В частности, потери в стали сердечника статора таких двигателей при $q = 1$ увеличиваются в 1,2 раза, а при $q = 0,5$ — примерно в 1,75 раза. В двигателях с $q = 0,5$, кроме того, возникают потери в стали сердечника ротора, обусловленные 2-й гармоникой, частота поля которой относительно ротора равна частоте сети, а индукция составляет половину индукции основного поля. Такие двигатели должны выполняться только со скосом пазов.

г) Размерные расчеты катушек всыпных обмоток

Катушечные группы обмоток, укладываемых механизированным способом, состоят из концентрически расположенных катушек с лобовыми частями прямоугольной формы (рис. 4-5, а). При ручной укладке применяются катушки с прямоугольной или трапецевидной (рис. 4-5, б) формой лобовой части. Основные размеры катушки — длина вылета лобовой части (l_b), длина лобовой части (l_n) и полная длина витка (l_w) — определяются по формулам:

$$l_B = k_B \tau_y; \quad (4-16)$$

$$l_{\text{л}} = k_{\text{л}} \tau_y; \quad (4-17)$$

$$l_w = 2(l_{\text{л}} + l_1), \quad (4-18)$$

где τ_y — средняя ширина катушки,

$$\tau_y = \frac{\pi(D_{i1} + h_{z1})}{z_1} y_{\text{ср}};$$

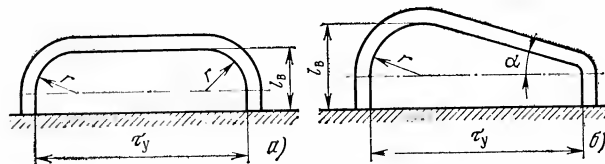


Рис. 4-5. Форма лобовых частей всыпных обмоток.

а — при механизированной укладке; б — при ручной укладке.

$y_{\text{ср}}$ — средний шаг обмотки (в зубцовых делениях). Коэффициент $k_{\text{л}}$ может быть найден по рис. 4-5, а и б:

$$k_{\text{л}} = 2k_{\text{в}} - (4 - \pi)k_r + 1 = 2k_{\text{в}} - 0,86k_r + 1;$$

$$k_{\text{л}} = 2(k_{\text{в}} - k_r) + (1 - k_r) \cos \alpha + (\pi/2 + \alpha)k_r.$$

Обычно для обмотки по рис. 4-5, б $k_r = 0,25$. Тогда $\alpha \approx \pi/9$ и $k_{\text{л}} = 2k_{\text{в}} \pm 0,7$.

Значения коэффициентов $k_{\text{в}}$, $k_{\text{л}}$, k_r приведены в табл. 4-2.

Таблица 4-2

2p	Катушка с прямоугольными лобовыми частями			Катушка с трапециевидными лобовыми частями		
	$k_{\text{в}}$	$k_{\text{л}}$	k_r	$k_{\text{в}}$	$k_{\text{л}}$	k_r
2	0,27	1,35	0,2	0,35	1,40	0,25
4	0,31	1,40	0,25	0,40	1,50	0,25
6	0,40	1,55	0,3	0,45	1,60	0,25
8	0,52	1,65	0,45	0,60	1,90	0,25

4-6. ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ

Обмотки фазных роторов асинхронных двигателей выполняются всыпными и стержневыми.

а) Всыпные обмотки

Всыпные обмотки фазных роторов — обычные петлевые трехфазные двухслойные равнокатушечные обмотки с укороченным шагом, укладываемые в полукрытые пазы ротора трапециевидно-овальной формы. Катушки каждой обмотки фазы мотаются на шаблонах без разрыва. Окончательная форма лобовым частям придается после укладки катушек в пазы. Чаще всего эти обмотки изготавливаются из проводов диаметром до 1,70 мм. Марка провода, конструкция корпусной и междуфазовой изоляции, пропиточные и покровные лаки такие же, как для статорных обмоток.

Предпочтительно целое число пазов ротора на полюс и фазу $q_2 = q_1 + 1$, иногда берут $q_2 = q_1 \pm 0,5$. Значения шага обмотки y_2 рекомендуется брать по табл. 4-3.

Таблица 4-3

q_2	2	3	4	5	6			
y_2 $k_{\text{об2}}$	5 0,933	7 0,902	9 0,885	10 0,925	11 0,874	12 0,910	13 0,876	14 0,898

Обычно роторы со всыпными обмотками проектируются так, чтобы линейное напряжение на контактных кольцах при соединении обмоток фаз в звезду было около 380 В. Поэтому коэффициент трансформации k_r берется равным или близким к единице.

В пазах катушки крепятся клинья, а в лобовых частях — привязкой к обмоткодержателям, которые для улучшения охлаждения снабжены вентиляционными лопатками.

Достоинства всыпных обмоток:

1) возможность повышения напряжения на кольцах ротора до линейного напряжения статора и соответственно снижения тока ротора, вследствие чего радикально улучшаются условия работы узла контактных колец: снижаются потери и нагрев и обеспечивается возможность уменьшения размеров этого узла; радикально улучшаются условия работы пусковой и регулирующей аппаратуры, что существенно повышает надежность приводов;

2) возможность уменьшения числа пазов ротора, вследствие чего уменьшается расход изоляционных материалов и упрощается изготовление штампов;

3) простота изготовления, возможность механизации укладки аналогично якорным обмоткам машин постоянного тока.

Учитывая все эти достоинства, следует всемерно рекомендовать применение вспыхивающих обмоток фазных роторов для двигателей мощностью до 50 кВт.

б) Стержневые обмотки

Стержневые обмотки фазных роторов — двухслойные волновые обмотки — образуются стержнями из прямоугольной медной мягкой проволоки, уложенными в прямоугольные полуоткрытые пазы ротора. В каждый

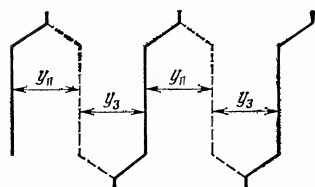


Рис. 4-6. Элементы стержневой обмотки фазного ротора.

паз закладываются два заранее изолированных стержня. В лобовых частях стержни отогнуты, как показано на рис. 4-6. Шаг между соединяемыми стержнями со стороны контактных колец называется передним y_n , а с противоположной стороны — задним y_z ; они выражаются в зубцовых делениях. Сумма переднего и заднего шагов составляет двойное полюсное деление.

Передний шаг $y_n = y_z = 3q$ при q , равном целому числу, $y_n = y_z + 1 = 3q + 0,5$ — при q , равном целому числу $+0,5$. Чтобы не замкнуть обмотку после обхода окружности ротора, последний в каждом обходе шаг y_n делают укороченным и равным $y_z - 1$ при q , равном целому числу, $y_n = y_z$ — при q , равном целому числу $+0,5$.

Сделав q обходов в одну сторону при целом q и $q + 1$ обходов в одну сторону при q , равном целому числу $+0,5$, соединяют между собой два нижних стержня и делают q или $q - 0,5$ обходов в обратную сторону. Шаг при промежуточном соединении стержней равен y_n . Так образуется каждая обмотка фазы ротора.

Для облегчения составления схем обмоток приведена вспомогательная табл. 4-4, в которой для наиболее

p	z ₂	j	y ₃	y _{II}	y _{III}	Начало обмоток фаз			Концы обмоток фаз			Промежуточные соединения в обмотках фазы		
						p1	p2	p3	p4	p5	p6	I	II	III
4	48	4	12	12	11	1	33	17	13	45	29	34—46	18—30	2—14
4	54	4,5	13	14	13	1	37	19	14	50	32	37—51	19—33	1—15
4	72	6	18	18	17	1	49	25	19	67	43	50—68	26—44	2—20
6	54	3	9	9	8	1	43	13	10	52	22	44—53	32—41	2—11
6	63	3,5	10	11	10	1	50	15	11	60	25	50—61	36—47	1—12
6	72	4	12	12	11	1	57	17	13	69	29	58—70	42—54	2—14
6	90	5	15	15	14	1	71	21	16	86	36	72—87	52—67	2—17
8	72	3	9	9	8	1	49	25	10	58	34	62—71	38—47	14—23
8	84	3,5	10	11	10	1	57	29	11	67	39	71—82	43—54	15—26
8	96	4	12	12	11	1	65	33	13	77	45	82—94	50—62	18—30
10	75	2,5	7	8	7	1	51	26	8	58	33	66—74	41—49	16—24
10	105	3,5	10	11	10	1	71	36	11	81	46	92—103	57—68	22—33
10	120	4	12	12	11	1	81	41	13	93	53	106—118	66—78	26—38
12	72	2	6	6	5	1	53	21	7	59	27	66—72	46—52	14—20
12	90	2,5	7	8	7	1	66	26	8	73	33	81—89	56—64	16—24
12	126	3,5	10	11	10	1	92	36	11	102	46	113—124	78—89	22—33
12	144	4	12	12	11	1	105	41	13	117	53	130—142	90—102	26—38

распространенных z_2 указаны шаги, начала и концы фаз и номера стержней промежуточных соединений.

Широкое распространение получила упрощенная волновая обмотка [30]. Она не требует специальных стержней — перемычек для промежуточных соединений полуфаз. Поворот осуществляется для каждой обмотки фазы с помощью косо расположенного стержня, переходящего из одного слоя пазы в другой. Паз с косым стержнем должен быть сдвинут относительно пазы с начальным стержнем фазы на $2z_2/3p - 1$ пазов в направлении, обратном ходу обмотки. Число стержней обмотки фазы на один меньше, чем у обычной волновой обмотки. Некоторое искажение поля не оказывает существенного влияния на работу двигателя. Паза с косыми стержнями указаны в табл. 4-4 первыми цифрами в колонке «Промежуточные соединения».

Число пазов на полюс и фазу стержневой роторной обмотки $q_2 = q_1 \pm 1$ или $q_2 = q_1 \pm 0,5$. Обозначим порядок гармоник м. д. с. обмотки ротора через μ . При целом q_2 $k_{обм} = k_{рм}$; обмоточный коэффициент распределения определяется по (4-3) с заменой ν на μ ; при

q_2 , равном дробному числу, обмоточный коэффициент может быть рассчитан по [41]:

$$k_{обм} = \frac{\sin(\pi/6)}{\cos(\mu\pi y_i/6c)} \sin(y_i \mu\pi/2\tau),$$

где $y_i = (1+3c)/d$; $d=2$; c определяется из условия $q_2=c/d$ — несократимая дробь; $\mu=3k_2+1$.

Применение стержневых обмоток фазных роторов вполне рационально в двигателях средней и большой мощности, когда напряжение на контактных кольцах находится в пределах 250 — 500 В.

Недостатками стержневых обмоток являются наличие большого числа паяк, необходимость выполнения большого объема работ вручную, а следовательно, большая трудоемкость изготовления таких обмоток.

4-7. ОБМОТКИ МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ЧИСЛА ПОЛЮСОВ

а) Обмотки с переключением числа полюсов в отношении 1:2

Переключение числа полюсов в отношении 1:2 может осуществляться изменением направления тока в отдельных ветвях каждой обмотки фаз.

В этом случае двигатель выполняется с двухслойной обмоткой; каждая обмотка фазы разделяется на две равные части, которые могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. Принцип действия таких обмоток достаточно подробно рассматривается в общих курсах по электрическим машинам, например [31]. Число катушек, соединенных последовательно в катушечную группу, соответствует при меньшем числе полюсов числу пазов на полюс и фазу q , а при большем числе полюсов — $2q$. Поэтому фазная зона при меньшем числе полюсов составляет $\pi/3$, а при большем — $2\pi/3$ рад. Шаг обмотки при большем числе полюсов принимают равным полюсному делению, для меньшего числа полюсов он получается равным половине полюсного деления. При этом форма кривой м. д. с. обмотки статора с фазной зоной $2\pi/3$ наиболее близка к синусоидальной. При удлинённых шагах на основную кривую м. д. с. накладываются четные гармоники, из которых наиболее существенными являются 2-я и 4-я гармоники.

Экспериментальные исследования показали, что наличие четных гармоник в кривой м. д. с. при неблагоприятном соотношении числа пазов статора и ротора (что вполне вероятно хотя бы для одной из частот вра-

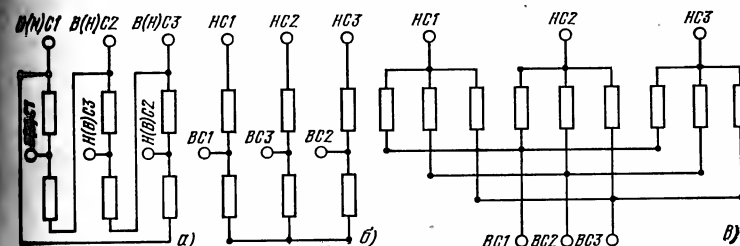


Рис. 4-7. Схемы соединения обмоток двухскоростных двигателей.

а — схема Δ/ΥΥ и ΥΥ/Δ, соединение Δ — питание В(Н)С1, В(Н)С2, В(Н)С3; В(Н)С1, Н(В)С2, Н(В)С3 свободны; соединение ΥΥ — питание Н(В)С1, Н(В)С2, Н(В)С3; В(Н)С1, В(Н)С2, В(Н)С3 замкнуты; б — схема ΥΥ/Υ, соединение ΥΥ — питание ВС1, ВС2, ВС3; НС1, НС2, НС3 замкнуты; соединение Υ — питание НС1, НС2, НС3; ВС1, ВС2, ВС3 свободны; в — схема тройной звезды с выводами из нулевых точек.

щения) приводит к существенному ухудшению характеристик двигателя: появлению провалов в механической характеристике и к увеличению уровня магнитно-

Таблица 4-5

Вид привода	Частота вращения	Соединение обмоток фаз	Соотношение мощностей		Минимальное число выводных концов	Вид приводимых механизмов
			P_2 высш	P_2 низш		
4-7, а	Высшая	Треугольник	1—1,1	6		Транспортеры, питатели
	Низшая	Двойная звезда				
4-7, а	Высшая	Двойная звезда	1,3—1,45	6		Станки, краны
	Низшая	Треугольник				
4-7, б	Высшая	Двойная звезда	2,3—2,5	6		Вентиляторы, воздухоудовки. Центробежные насосы
	Низшая	Звезда				

го шума. Эти же явления наблюдаются при эксцентриситете воздушного зазора.

Учитывая, что обмотки фаз могут соединяться как в звезду, так и в треугольник (рис. 4-7), можно получить ряд схем соединения обмоток [32]. В табл. 4-5 приведены характеристики наиболее распространенных из них.

Исходя из приемлемых значений индукций в многоскоростном двигателе при сопряжении фаз Δ/YU и YU/Δ , в качестве базового следует принять двигатель низшей скорости. Из тех же соображений при соединении фаз YU/Y базовым должен быть двигатель высшей скорости.

б) Обмотки с переключением числа полюсов в отношении, не равном 1:2

Путем переключения части катушек каждой обмотки фазы для изменения в них направления тока можно изменить распределение м. д. с. по окружности статора и тем самым ступенчато изменить число пар полюсов и частоту вращения ротора. В описанных схемах этот способ был использован для получения однообмоточных двигателей с отношением скоростей 2:1.

В 1957 г. в Англии Роуклиф развил этот метод, применив не только переключение, но и отключение части катушек, а также исполнение катушек с разным числом витков для получения однообмоточных двухскоростных двигателей с отношением скоростей, не равным 2:1, а также трехскоростных двигателей. Так как по этому методу происходит изменение амплитуды м. д. с. полюсов вдоль окружности статора, то по аналогии с модуляцией электромагнитных волн автор назвал, вероятно не очень удачно, предложенный им метод полюсно-амплитудной модуляцией (ПАМ)*. Этот метод пояснен на примере рис. 4-8, где показано, что путем отключения двух катушек в каждой фазе и включения четырех остальных по две параллельно можно преобразовать шестиполюсный двигатель в четырехполюсный.

* Модуляция электромагнитных волн состоит в наложении волн одной частоты на волну другой частоты и в получении таким путем волны новой частоты. При полюсно-амплитудной модуляции физически такого наложения не происходит. Однако для объяснения этого принципа автор представил изменение частоты вращения как подобное наложение волн м. д. с.

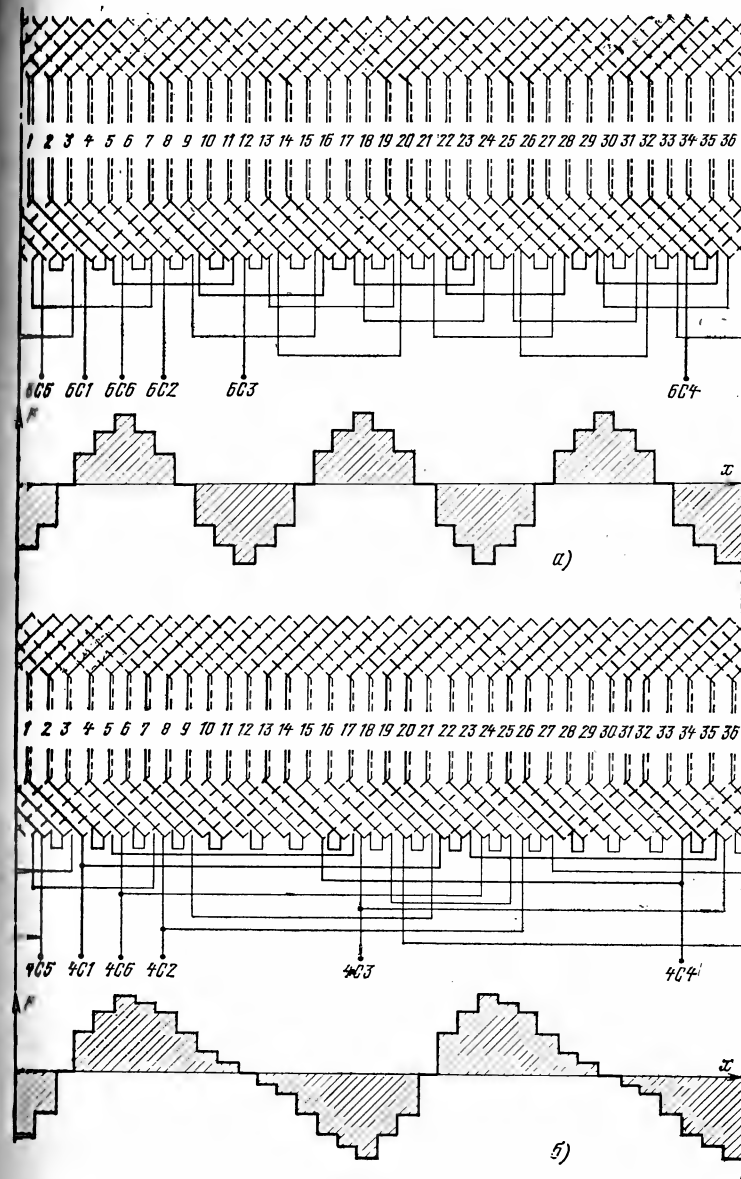


Рис. 4-8. Схема и кривая м. д. с. полюсно-переключаемой обмотки по методу ПАМ.

а — $2p=6$; б — $2p=4$.

Таблица 4-6

Параметр	2p=6		2p=4	
	ПАМ	2 обмотки раздельно	ПАМ	2 обмотки раздельно
Номинальная мощность, кВт	5,7	4,3	7,8	6,6
Превышение температуры обмотки, °C	74	74	72	74
Номинальная частота вращения, об/мин	965	975	1460	1470
К. п. д., %	82	79	84	84
Кратность начального пускового тока	5,2	5,9	7,6	7,2
Кратность начального пускового момента	1,5	1,9	1,6	1,8
Суммарное сечение проводников в пазу, %	100	49	100	51
Плотность тока, А/мм ²	5,8	8,7	5,9	7,4
Обмоточный коэффициент	0,88	0,97	0,72	0,96
B_8 , Тл	0,81	0,81	0,81	0,85

Однообмоточные многоскоростные двигатели, выполненные по методу ПАМ, имеют при равной мощности с двухобмоточными меньший расход материалов, меньшие габариты, меньшую трудоемкость изготовления. Число выводных концов у них минимальное. В табл. 4-6 приведены данные [33] сравнения показателей двухскоростного двигателя, выполненного с одной обмоткой по методу ПАМ и с двумя раздельными обмотками.

За рубежом двигатели с ПАМ применяются широко. В Советском Союзе рядом авторов: А. И. Антоненко [34], М. К. Захаровым [35], А. М. Харитоновым [36] разработаны оригинальные схемы однообмоточных двухскоростных двигателей с соотношением чисел полюсов, не равным 1 : 2, не уступающие схемам с ПАМ.

Одной из таких схем является схема тройной звезды [34] с выводами из нулевых точек (см. рис. 4-7, в). Каушки каждой ветви такой обмотки при прохождении по ним переменного тока возбуждают пульсирующее магнитное поле, содержащее сильно выраженные пространственные гармонические составляющие с требуемым числом полюсов, причем пространственное положение этих составляющих такое, что ветви, подключенные к

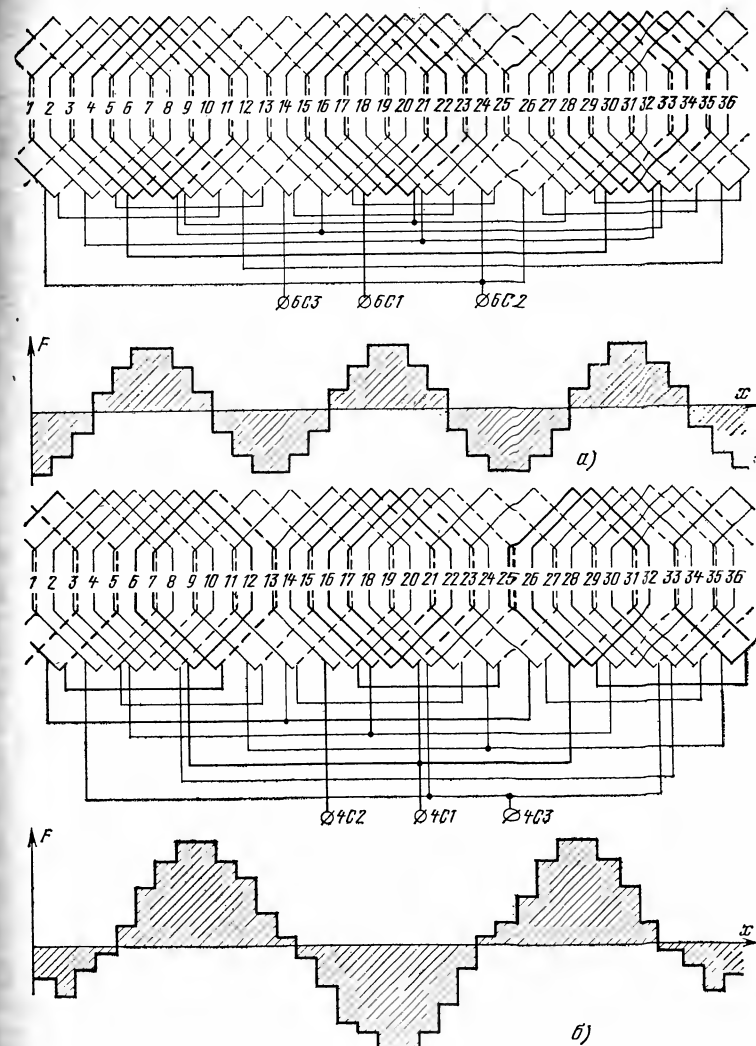


Рис. 4-9. Схема и кривая м. д. с. полюсно-переключаемой обмотки, соединенной в тройную звезду с выводами из нулевых точек.
а — 2p=4; б — 2p=6.

соответствующим зажимам одной полюсности и обтекаемые одинаковыми токами, образующими симметричную систему, взаимно усиливают одну из вращающихся гармонических составляющих этой полюсности и уничтожают составляющую другой полюсности. Примененная в двигателях серии 4А100 схема обмотки (рис. 4-9, а, б) на четыре и шесть полюсов, разработанная в Институте электродинамики АН УССР, обеспечивает это свойство за счет выполнения катушек с числом витков в отношении 1:2:3. Катушки с удвоенным числом витков на рис. 4-9, а, б выделены утолщенными линиями. Возникающая при этом геометрическая разность м.д.с. параллельных ветвей при $2p=4$ имеет допустимое значение. По отношению к шестиполюсному полю обмотка является симметричной, распределение катушек по фазам аналогично односкоростной обмотке. Коэффициенты распределения и обмоточные коэффициенты соответственно при четырех и шести полюсах составляют: $k_{p4}=0,955$; $k_{p6}=0,932$; $k_{об4}=0,827$; $k_{об6}=0,932$. Обмотка проста в изготовлении, так как выполняется из одинаковых катушек аналогично односкоростным обмоткам с той лишь разницей, что в некоторые пазы укладывают одновременно две катушки. Применение такой обмотки позволяет увеличивать мощность двигателя примерно в 1,5 раза по сравнению с двухобмоточным.

Глава пятая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

5-1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

а) Схема замещения и ее параметры

В основу анализа свойств трехфазного асинхронного двигателя положена схема замещения (рис. 5-1, а), впервые предложенная Т. Г. Сорокером [38]. Эта схема отличается от общепринятых включением на выводы внешней цепи резистора r_c , потери в котором равны потерям в стали P_c (основным и добавочным). Предполагается, что потери в стали определяются потоком, соответствующим полным потокосцеплениям обмотки статора (включающим и потокосцепления рассеяния). Очевидно,

если пренебречь падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора, то этому потоку соответствует напряжение внешней цепи. Исходя из этого

$$r_c = 3U_1^2/P_0; \quad I_{0a} = U_1/r_c = P_0/3U_1. \quad (5-1)$$

На первом этапе примем, то параметры схемы замещения: r_1, r_2' (активные сопротивления обмоток статора

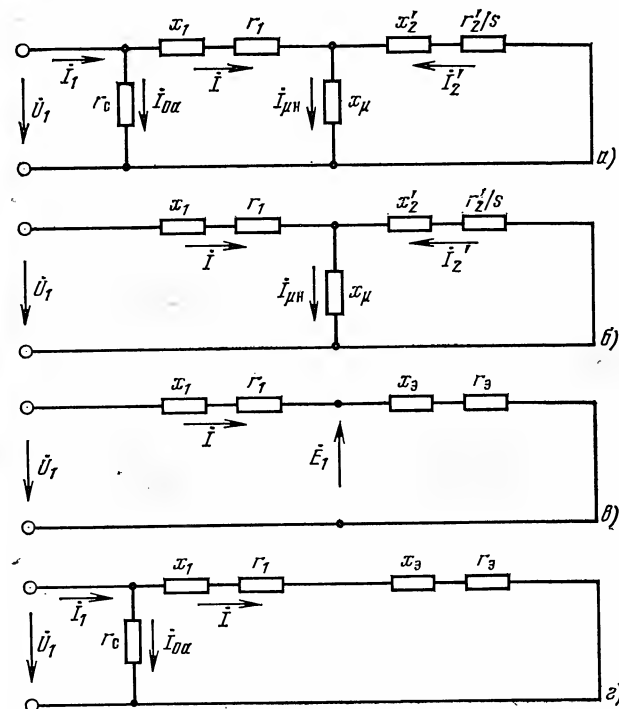


Рис. 5-1. Схемы замещения.

и ротора); x_1, x_2' (индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора) и x_m (главное индуктивное сопротивление обмотки статора) — постоянны.

Для первоначального анализа и определения зависимости электромагнитной мощности (момента) от скольжения $P_{эм} f(s)$ схема замещения может быть упрощена (рис. 5-1, б).

Для этой схемы, заменяя сопротивления x'_2 , r'_2/s и x_μ эквивалентным сопротивлением, можно написать следующие соотношения:

$$Z_{\text{эк}} = Z_\mu Z'_2 / (Z_\mu + Z'_2) = r_{\text{эк}} + jx_{\text{эк}}, \quad (5-2)$$

$$\text{где } Z_\mu = jx_\mu; \quad Z'_2 = r'_2/s + jx'_2;$$

$$r_{\text{эк}} = \frac{\frac{x_\mu^2}{r'_2/s}}{1 + \left(\frac{x_\mu + x'_2}{r'_2/s}\right)^2}; \quad (5-3)$$

$$x_{\text{эк}} = x_\mu - r_{\text{эк}} \frac{x_\mu + x'_2}{r'_2/s}. \quad (5-4)$$

На основании этих соотношений схема замещения, изображенная на рис. 5-1, б, может быть преобразована в схему на рис. 5-1, в, где все сопротивления включены последовательно и по ним протекает ток I . Полное сопротивление этой цепи Z равно:

$$\begin{aligned} Z &= (r_1 + r_{\text{эк}}) + j(x_1 + x_{\text{эк}}) = \\ &= (r_1 + r_{\text{эк}}) + j\left(x_1 + x_\mu - r_{\text{эк}} \frac{x_\mu + x'_2}{r'_2/s}\right). \end{aligned} \quad (5-5)$$

Отметим, что r_1 , x_1 , x'_2 и x_μ — постоянные параметры, а $r_{\text{эк}}$ и $x_{\text{эк}}$ — переменные, зависящие от скольжения s .

б) Зависимость электромагнитной и механической мощностей от скольжения

В соответствии со схемой замещения (рис. 5-1, в) электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ равна:

$$P_{\text{эм}} = 3I^2 r_{\text{эк}} = 3 \frac{U_1^2}{|Z|^2} r_{\text{эк}}. \quad (5-6)$$

Подставив значение $|Z|$ из (5-5) и $r_{\text{эк}}$ из (5-3), получим следующую зависимость электромагнитной мощности от скольжения:

$$P_{\text{эм}} = \frac{3U_1^2}{R'_2/s + 2r_1 + R'_2 s}, \quad (5-7)$$

где

$$R'_2 = r'_2 [(r_1/x_\mu)^2 + (1 + x_1/x_\mu)^2]; \quad (5-8)$$

$$R'_2 = r'_2 \left\{ \left[\frac{r_1}{r'_2} \left(1 + \frac{x'_2}{x_\mu} \right) \right]^2 + \left[\frac{x_1}{r'_2} \left(1 + \frac{x'_2}{x_\mu} \right) + \frac{x'_2}{r'_2} \right]^2 \right\}. \quad (5-9)$$

Решим уравнение (5-7) относительно s :

$$s = \frac{(3U_1^2/2P_{\text{эм}} - r_1) \pm \sqrt{(3U_1^2/2P_{\text{эм}} - r_1)^2 - R'_2 R'_2}}{R'_2}. \quad (5-10)$$

Отметим, что двигателю режиму в (5-10) и в (5-14) соответствует знак минус перед корнем.

Выражение (5-7) позволяет определить максимальное (критическое) значение электромагнитной мощности $P_{\text{эм, кр}}$:

$$P_{\text{эм, кр}} = \frac{3U_1^2}{2(r_1 + \sqrt{R'_2 R'_2})}; \quad (5-11)$$

начальное значение электромагнитной мощности при пуске $P_{\text{эм, п}}$ ($s=1$)

$$P_{\text{эм, п}} = \frac{3U_1^2}{R'_2 + R'_2 + 2r_1} \quad (5-12)$$

и критическое скольжение $s_{\text{кр}}$

$$s_{\text{кр}} = \pm \sqrt{R'_2/R'_2}. \quad (5-13)$$

Зависимость механической мощности $P_{\text{мех}}$ от скольжения s $P_{\text{мех}} = f(s)$ можно получить из выражения

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} (1 - s),$$

подставив в него $P_{\text{эм}}$ из (5-7).

Решим полученное уравнение относительно s :

$$s = \frac{(3U_1^2/2P_{\text{мех}} - r_1) \pm \sqrt{(3U_1^2/2P_{\text{мех}} - r_1)^2 - R'_2(R'_2 + 3U_1^2/P_{\text{мех}})}}{3U_1^2/P_{\text{мех}} + R'_2}. \quad (5-14)$$

Таким образом, по параметрам схемы замещения можно для любого значения мощности P_2 определить соответствующую ей механическую мощность

$$P_{\text{мех}} = P_2 + P_{\text{мех, п}} + P_{\text{добр}}, \quad (5-15)$$

найти непосредственно скольжение и все характеристики двигателя, не прибегая к методу последовательных приближений, свойственному круговым диаграммам. В (5-15) $P_{\text{мех,л}}$ — механические потери, $P_{\text{доб,л}}$ — добавочные потери.

Для расчета $s_{\text{кр}}$, $P_{\text{эм,кр}}$ и $P_{\text{эм,л}}$ двигателей с переменными параметрами необходимо в соответствующие выражения подставлять значения $r'_{2\xi N}$, x_{1N} и $x'_{2\xi N}$, определенные с учетом вытеснения тока в стержнях (индекс ξ) и насыщения путей потоков рассеяния (индекс N).

в) Ток статора. Коэффициент мощности. Ток ротора

Схема замещения (рис. 5-1, в) может быть преобразована в схему, изображенную на рис. 5-1, г. Из этой схемы видно, что ток I_1 равен:

$$I_1 = I_a + I = I_a + I_r, \quad (5-16)$$

где I_a и I_r — соответственно активная и реактивная составляющие тока I .

Так как $I = U_1/|Z|$; $\cos \varphi' = (r_1 + r_{\text{эк}})/|Z|$ и $\sin \varphi' = (x_1 + x_{\text{эк}})/|Z|$, то

$$I_a = I \cos \varphi' = \frac{U_1 r_{\text{эк}}}{|Z|^2} \left(1 + \frac{r_1}{r_{\text{эк}}} \right), \quad (5-16a)$$

Подставив $|Z|^2/r_{\text{эк}} = R'_2/s + 2r_1 + R''_2 s$ в (5-16), получим:

$$I_a = \frac{U_1}{R'_2/s + 2r_1 + R''_2 s} \left(1 + \frac{r_1}{r_{\text{эк}}} \right); \quad (5-17)$$

$$I_r = I \sin \varphi' = \frac{U_1 r_{\text{э}}}{|Z|^2} \left(\frac{x_1 + x_{\text{э}}}{r_{\text{э}}} \right);$$

$$I_r = \frac{U_1}{R'_2/s + 2r_1 + R''_2 s} \left(\frac{x_1 + x_{\text{э}}}{r_{\text{э}}} \right); \quad (5-18)$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}. \quad (5-19)$$

На основании (5-16) получим выражение для тока I_1 :

$$I_1 = \sqrt{(I_a + I_{0a})^2 + I_r^2}. \quad (5-20)$$

В схеме замещения на рис. 5-1, а не точно учитываются потери в обмотке статора: по схеме $P_{\text{м1}} = 3I^2 r_1$, а фактически $P_{\text{м1}} = 3I_1^2 r_1$. Допущенная погрешность равна:

$$3I_1^2 r_1 - 3I^2 r_1 \approx 2I_{0a}(I_a + I_{0a})3r_1. \quad (5-21)$$

Ее следует учитывать при определении потребляемой мощности P_1 и $\cos \varphi$:

$$P_1 = 3U_1(I_{0a} + I_a)(1 + 2r_1/r_c); \quad (5-22)$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{0a} + I_a}{I_1} \left(1 + \frac{2r_1}{r_c} \right). \quad (5-23)$$

Из рис. 5-1, а видно, что намагничивающий ток при нагрузке $I_{\mu n}$ и ток ротора, приведенный к первичной цепи, I'_2 соответственно равны:

$$I_{\mu n} = E_1/x_{\mu}; \quad (5-24)$$

$$I'_2 = \sqrt{I_a^2 + (I_r - I_{\mu n})^2}, \quad (5-25)$$

где E_1 — э. д. с. первичной цепи при нагрузке,

$$E_1 = I \sqrt{r_{\text{эк}}^2 + x_{\text{эк}}^2} = U_1 \sqrt{\frac{r_{\text{эк}}^2 + x_{\text{эк}}^2}{r_{\text{эк}}(R'_2/s + 2r_1 + R''_2 s)}}. \quad (5-26)$$

Отметим, что э. д. с. холостого хода E_0 равна:

$$E_0 = I_{\mu} x_{\mu} = \frac{U_1 x_{\mu}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{\mu})^2}} \approx U_1 \frac{x_{\mu}}{x_1 + x_{\mu}}. \quad (5-26a)$$

г) Кратности максимального и начального пускового моментов. Начальный пусковой ток

На основании уравнений (5-7), (5-11) и (5-12) можно получить формулы для расчета кратности максимального и начального моментов:

$$\frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{н}}} = \frac{R'_2/s_{\text{н}} + 2r_1 + R''_2 s_{\text{н}}}{2(r_1 + \sqrt{R'_{2N} R''_{2N}})}; \quad (5-27)$$

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = \frac{R'_2/s_{\text{н}} + 2r_1 + R''_2 s_{\text{н}}}{R'_{2\xi N} + 2r_1 + R''_{2\xi N}}. \quad (5-28)$$

При определении пускового тока можно пренебречь составляющей I_{0a} , т. е.

$$I_{1п} = \frac{U_1}{\sqrt{(R'_{2\frac{1}{2}N} + 2r_1 + R''_{2\frac{1}{2}N}) r_{эк}}} \quad (5-29)$$

5-2. РАСЧЕТ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА И ГЛАВНОГО ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА

а) Приложение закона полного тока к расчету магнитной цепи

Расчет намагничивающего тока асинхронной машины основан на законе полного тока:

$$\oint_L H dl = \Sigma i, \quad (5-30)$$

где L — контур произвольной формы; H — напряженность магнитного поля в направлении dl ; dl — элемент длины контура в направлении обхода; Σi — алгебраическая сумма токов, охватываемых замкнутым контуром.

Точное вычисление интеграла (5-30) затруднительно. На практике прибегают к упрощенному решению, разбивая магнитную цепь на участки длиной l_x с примерно постоянной напряженностью магнитного поля H_x вдоль участка. Тогда вместо (5-30) получим:

$$\Sigma H_x l_x = \Sigma F. \quad (5-31)$$

Магнитную цепь асинхронной машины принято разбивать на пять участков:

- участок воздушного зазора δ ;
- участок зубцов статора Z_1 ;
- участок зубцов ротора Z_2 ;
- участок спинки статора a_1 ;
- участок спинки ротора a_2 .

Тогда суммарная м. д. с. равна:

$$\Sigma F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{a1} + F_{a2}, \quad (5-32)$$

а намагничивающий ток I_μ

$$I_\mu = \frac{2,22}{m} \frac{p \Sigma F}{w_1 k_{об1}}. \quad (5-33)$$

Найдем м. д. с. для каждого из участков. При этом будем исходить из следующих упрощающих предположений: 1) м. д. с. вдоль полюсного деления распределены синусоидально; 2) статор и ротор гладкие, т. е. воздушный зазор равномерный; 3) магнитная цепь не насыщена. При этих условиях индукция в воздушном зазоре, зубцах и спинках статора и ротора определяется синусоидально на протяжении полюсного деления. Фактически все указанные предположения не соответствуют действительности. Зубчатость статора и ротора, влияние насыщения стали учитываются при расчете магнитных напряжений отдельных участков соответствующими поправками.

По закону полного тока (5-30) замкнутый контур обхода может быть выбран произвольно. Обычно в качестве контура обхода принимают среднюю линию магнитной индукции.

б) Магнитный поток

Расчет магнитной цепи производится для потока, соответствующего холостому ходу двигателя.

Расчетный магнитный поток

$$\Phi = \frac{E_0}{4,44 w_1 k_{об1} f_1}, \quad (5-34)$$

где э. д. с. E_0 из (5-26а) может быть представлена как

$$E_0 = k_E U_1;$$

здесь

$$k_E = \frac{x_\mu}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}} \approx \frac{x_\mu}{x_1 + x_\mu}. \quad (5-35)$$

Параметр k_E определяется методом последовательных приближений и уточняется после расчета x_μ . В качестве начального значения может быть принято $k_E = 1$ [40] или $k_E = 0,97$ [39]. По [41] начальное значение

$$k_E = 1 - 30\delta/\tau q. \quad (5-36)$$

В [52] предлагается учитывать влияние полей рассеяния, нагружающих отдельные участки магнитной цепи, значением k_E , равным

$$k_E = \frac{x_\mu + x_1 - x_{s1} - 0,5x_{п1}}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}},$$

где x_{s1} и $x_{п1}$ — индуктивные сопротивления рассеяния лобовых частей обмотки статора и пазового рассеяния соответственно.

в) Магнитное напряжение воздушного зазора

Магнитное напряжение воздушного зазора пропорционально максимальному значению индукции в воздушном зазоре B_δ и длине индукционной линии на этом участке. Для определения B_δ необходимо найти отношение

$$\alpha_i = B_{\delta cp} / B_\delta, \quad (5-37)$$

тогда

$$B_\delta = B_{\delta cp} / \alpha_i = 2p\Phi / \pi D_{i1} l_i \alpha_i. \quad (5-38)$$

При синусоидальном распределении индукции $\alpha_i = 2/\pi$.

Насыщение зубцов статора и ротора искажает синусоидальное распределение индукции, вызывая так называемое

уплощение, вследствие чего α_i увеличивается (рис. 5-2). Степень насыщения зубцов характеризуется коэффициентом насыщения

$$k_z = 1 + (F_{z1} + F_{z2}) / F_\delta. \quad (5-39)$$

Значение $1/\alpha_i$ находят методом последовательных приближений. При этом в качестве начального рекомендуется значение $1/\alpha_i = 1,4$.

Зубчатость статора и ротора увеличивает магнитное напряжение воздушного зазора и учитывается коэффициентом k_δ . Таким образом, получим:

$$F_\delta = H_\delta \delta k_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta k_\delta = 0,8 \cdot 10^6 B_\delta \delta k_\delta, \quad (5-40)$$

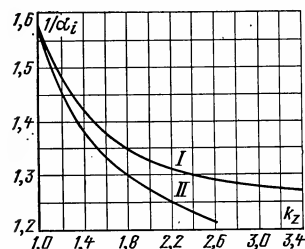


Рис. 5-2. Зависимость $1/\alpha_i = f(k_z)$.
I — по [37, 42]; II — [40].

где k_δ — коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера).

При двусторонней зубчатости коэффициент k_δ приближенно представляют произведением коэффициентов воздушного зазора $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$, учитывающих зубчатость статора и ротора соответственно:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}. \quad (5-41)$$

Коэффициент воздушного зазора — функция зубцового деления t , открытия паза b_s и воздушного зазора δ . По методике зазора «Электросила»

$$k_{\delta 1(2)} = \frac{t_{1(2)} + 10\delta}{t_{1(2)} + 10\delta - b_{s1(2)}}. \quad (5-41a)$$

По [40]

$$k_\delta = t / (t - y b_s), \quad (5-41б)$$

где $y = f(b_s/\delta)$; $y \approx b_s / (5\delta + b_s)$.

По [41]

$$k_{\delta 1(2)} = 1 + \frac{b_{s1(2)}}{t_{1(2)} - b_{s1(2)} + 5\delta \frac{t_{1(2)}}{b_{s1(2)}}}. \quad (5-41в)$$

г) Магнитное напряжение зубцов

Примем равномерное распределение индукции в воздушном зазоре вдоль зубцового деления t . При этом магнитный поток, приходящийся на зубцовое деление, при насыщении зубцов будет проходить частично через зубец и частично параллельно зубцу — через паз. С учетом сказанного расчетная индукция в зубцах определится из решения уравнения

$$B_z = B_\delta \frac{t}{k_c b_z} - 0,4\pi \cdot 10^{-4} k'_z \psi(B_z), \quad (5-42)$$

где k_c — коэффициент заполнения сердечника сталью. Значения k_c (для стали толщиной 0,5 мм) приводятся в табл. 5-1; k'_z — коэффициент, учитывающий ответвление потока в паз,

$$k'_z = \frac{1 - k_c + b_{п1}/b_z}{k_c};$$

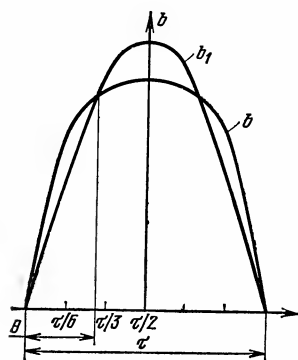


Рис. 5-3. К определению θ .

b_z — расчетная ширина зубца;
 b_n — расчетная ширина паза;
 $\psi(B_z)$ — кривая намагничивания.

При α_i , найденному по рис. 5-2, $\psi(B_z)$ определяется по основной кривой намагничивания.

По методу, предложенному Ф. Пунга [47] и усовершенствованному Т. Г. Сорокером [41], расчет B_δ , B_z ведется для синусоидального поля, ($1/\alpha_i = \pi/2$), а уплощение учитывается в значениях напряженности магнитного поля в зубцах H_z , определяемой по основной кривой намагничивания для принятой марки стали $H = \psi(B)$ в соответствии с уравнением

$$H_z = \frac{1}{\sin \theta} \psi(B_z \sin \theta), \quad (5-43)$$

где θ — угловая координата точки пересечения действительной кривой индукции в воздушном зазоре b с первой гармонической этой кривой b_1 (рис. 5-3).

Таблица 5-1

Класс стали по виду прокатки	k_c при изоляции листов	
	оксидной пленкой	лаковой пленкой
Горячекатаная	0,95	0,93
Холоднокатаная	0,97	0,95

По [41] $\theta = 55^\circ$, $\sin \theta = 0,82$, $1/\sin \theta = 1,22$.

В развитие и уточнение этого метода в [52] предлагается определять значение угла θ в зависимости от насыщения магнитной цепи (рис. 5-4), характеризуемого средней индукцией $B_z = 0,5(B_{z1} + B_{z2})$ при различных значениях коэффициента C_δ , равного

$$C_\delta = 8000 \delta k_\delta k_a \frac{b_z k_c}{h_z t},$$

где $k_a = 1 + (F_{a1} + F_{a2})/F_\delta$; $h_z = h_{z1} + h_{z2}$.

Уравнение (5-42) может быть решено методом последовательных приближений или графически [5].

Напряженность магнитного поля в зубцах H_z найдется по основной кривой намагничивания $H = \psi(B)$ или по зависимости $H_z = \psi(B_z)$ (5-43). Так как ширина паза (или зубца) меняется вдоль высоты зубца, то в практи-

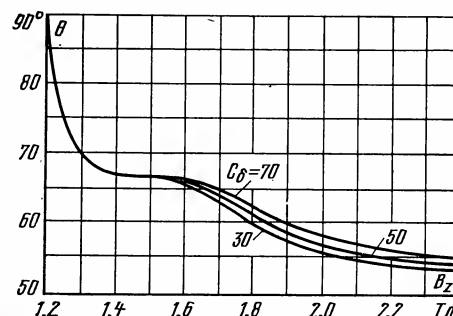


Рис. 5-4. Зависимость $\theta = f(C_\delta, B_z)$.

ческих случаях H_z определяют путем приближенного интегрирования по формуле

$$H_z = (H_{z0} + 4H_{zcp} + H_{zv})/6, \quad (5-44)$$

где H_{z0} , H_{zcp} , H_{zv} — напряженность магнитного поля в точках: у основания зубца, в середине и в верхнем сечении соответственно.

Магнитное напряжение зубцов

$$F_z = h_z H_z. \quad (5-45)$$

д) Магнитное напряжение спинки

Индукция в спинке не постоянна вдоль полюсного деления. Максимальное значение индукции в спинке равно:

$$B_a = \frac{D_{it}}{2h_a k_c p} B_\delta. \quad (5-46)$$

Предполагая синусоидальное распределение индукции в спинке вдоль расчетной силовой линии, можно определить среднюю напряженность магнитного поля в спинке H_a , используя формулу Симпсона:

$$H_a = \frac{1}{18} [\psi(B_a) + 4\psi(B_a \sin 75^\circ) + 2\psi(B_a \sin 60^\circ) + 4\psi(B_a \sin 45^\circ) + 2\psi(B_a \sin 30^\circ) + 4\psi(B_a \sin 15^\circ)], \quad (5-47)$$

где $\psi(B_a)$ — основная кривая намагничивания стали.

Для статоров двухполюсных двигателей при $B_a > B_{an}$ (B_{an} — магнитная индукция, соответствующая точке перегиба кривой намагничивания) напряженность магнитного поля в ярме определяется по основной кривой намагничивания для индукции, равной $B_a - \Delta B$. Значения B_{an} и ΔB для различных марок сталей приводятся в табл. 5-2.

Таблица 5-2

Марка стали	B_{an} , Тл	ΔB , Тл
1211; 1212; 1213; 1311; 1312	1,4	0,4
2013; 2112; 2212	1,55	0,45

Для роторов двухполюсных двигателей, насаженных непосредственно на вал, значение H_a определяют по основной кривой намагничивания.

В [52] предложен метод определения напряженности магнитного поля в спинке статора с учетом насыщения зубцов, несинусоидального распределения индукции и изменения индукции в спинке вследствие чередования зубцов и пазов. Магнитная индукция в n -й точке спинки статора равна:

$$B_{an} = C_a \frac{\pi}{72} (B_{z0} + 4B_{z1} + 2B_{z2} + 4B_{z3} + \dots + B_{z2n}),$$

где $B_{z0}, B_{z1}, \dots, B_{z2n}$ — значения магнитной индукции в зубцах статора с учетом уплощения в точках 0, 1, 2, 3, n вдоль полюсного деления;

$$C_a = \frac{1}{2p} \frac{b_{z1} D_{i1}}{t_1 h_{a1}}.$$

Расчетное значение напряженности магнитного поля в спинке находится как среднее значение напряженности вдоль силовой линии

$$H_a = \frac{1}{n} \left[\frac{b_z}{3} (4H_{a1} + 2H_{a2} + 4H_{a3} + \dots + 4H_{an-1} + H_{an}) + \left(1 - \frac{b_{z1}}{t_1} \right) (H_{a1} + H_{a2} + H_{a3} + \dots + H_{an}) \right],$$

где $H_{a1}, H_{a2}, \dots, H_{an}$ — напряженности, определяемые по основной кривой намагничивания для индукции B_{a1} ,

$B_{a2}, \dots, B_{an}$; n — число пазов на половине полюсного деления (четное число).

С достаточной для расчета степенью точности можно принять $n=6$. Следует отметить, что при расчете необходимо учитывать также уменьшение сечения спинки при наличии в ней пазов для скрепляющих скоб. Напряженность магнитного поля в спинке ротора определяется так же, как и в спинке статора, но с учетом некоторого перераспределения магнитного потока в зависимости от числа полюсов [43].

Магнитное напряжение спинки F_a

$$F_a = H_a L_a, \quad (5-48)$$

где L_a — длина средней линии магнитной индукции в спинке:

для статора

$$L_{a1} = \pi \frac{D_{a1} - h_{a1}}{4p}; \quad (5-49)$$

для ротора

$$L_{a2} = \pi \frac{D_{i2} + h_{a2} + 4/3 d_{k2}}{4p}; \quad (5-50)$$

для роторов двухполюсных двигателей, насаженных непосредственно на вал,

$$L_{a2} = h_{a2} + 2/3 d_{k2}; \quad (5-51)$$

$h_{a1(2)}$ — высота спинки статора (ротора); d_{k2} — диаметр аксиальных вентиляционных каналов в спинке.

б) Главное индуктивное сопротивление обмотки статора

Главное индуктивное сопротивление обмотки статора x_μ может быть определено из (5-26а)

$$x_\mu = E_0 / I_\mu.$$

или с учетом уравнений (5-33), (5-34), (5-38) для основной волны потока x_μ может быть выражено через параметры машины:

$$x_\mu = 2m\mu_0 \frac{2}{\pi} \frac{\tau l_1 \omega_1^2 k_{o61}^2 f}{k_\delta k_\mu \delta p} = \frac{4,8}{10^6} \frac{\tau l_1 \omega_1^2 k_{o61}^2 f}{k_\delta k_\mu \delta p}, \quad (5-52)$$

где $k_\mu = \Sigma F / F \delta$.

При расчете рабочего режима двигателей с насыщенной магнитной цепью ($k_\mu > 1,7$) главное индуктивное сопротивление обмотки статора определяется по потоку, соответствующему э. д. с. при нагрузке (5-26).

5-3. РАСЧЕТ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Активное сопротивление обмотки фазы статора или фазного ротора при $s \ll 1$ определяется без учета вытеснения тока в проводниках

$$r_{1(2)} = \frac{l_{w1(2)} w_{1(2)}}{\gamma_{1(2)} a_{1(2)} q_{m1(2)}}, \quad (5-53)$$

где l_w — длина витка обмотки; w — число последовательных витков обмотки фазы; a — число параллельных вет-

Т а б л и ц а 5-3

Материал обмотки	γ , См/м, при расчетной рабочей температуре, °C		
	20	75	115
Медный провод обмоточный	$56 \cdot 10^6$	$46 \cdot 10^6$	$41 \cdot 10^6$
Алюминиевый провод обмоточный	$34 \cdot 10^6$	$28 \cdot 10^6$	$25 \cdot 10^6$
Алюминий литой клетки ротора	$30 \cdot 10^6$	$25 \cdot 10^6$	$22,5 \cdot 10^6$

вей; q_m — сечение эффективного проводника; γ — удельная электрическая проводимость материала обмотки при расчетной рабочей температуре (табл. 5-3).

Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к статору,

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{w_1 k_{об1}}{w_2 k_{об2} k_{ск}} \right)^2 \frac{m_1}{m_2}. \quad (5-54)$$

Активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора без учета вытеснения тока, приведенное к статору,

$$r'_2 = (r_c + r_R) \frac{4m_1 w_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2, \quad (5-55)$$

r_c — сопротивление стержня клетки ротора,

$$r_c = l_c / \gamma q_c; \quad (5-56)$$

— сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня,

$$r_R = \frac{2\pi D_R}{z_2 \gamma q_R \Delta^2}; \quad (5-57)$$

l_c — длина стержня клетки ротора; q_c — сечение стержня клетки ротора; D_R — средний диаметр короткозамыкающего кольца; q_R — сечение короткозамыкающего кольца; $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{z_2}$ — коэффициент приведения тока кольца к току стержня; $k_{ск}$ — коэффициент скоса,

$$k_{ск} = \frac{2 \sin (\alpha_{ск}/2)}{\alpha_{ск}}; \quad (5-57a)$$

$\alpha_{ск} = \pi \frac{2p}{z_2} \beta_{ск}$ — центральный угол скоса пазов в электрических радианах; $\beta_{ск}$ — скос пазов в долях зубцового деления.

В соответствии с ГОСТ 183-74 для машин, предельно допускаемые температуры обмоток которых соответствуют классам нагревостойкости изоляции Е и В, принимается расчетная рабочая температура, равная 76°C; для машин, предельно допускаемые превышения температуры обмоток которых соответствуют классам нагревостойкости F и H, — 115°C.

5-4. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАССЕЯНИЯ

Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток асинхронной машины обусловлено магнитным полем рассеяния. Магнитное поле рассеяния складывается из нескольких составляющих: пазового рассеяния, рассеяния лобовых частей обмоток, рассеяния высших гармонических — дифференциального — и рассеяния скоса пазов.

Если в соответствии с этим в расчет ввести магнитную проводимость пазового рассеяния λ_p , рассеяния лобовых частей λ_s , дифференциального рассеяния λ_z и рассеяния скоса пазов $\lambda_{ск}$, отнесенную к единице длины сердечника l_1 , то формулы для определения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора и при-

веденного к первичной цепи индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора будут иметь вид:

$$x_1 = 4\pi f_1 \omega_1^2 \frac{l_1}{pq} \lambda_1; \quad (5-58)$$

$$x'_2 = x_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{l_2}{l_1} \frac{z_1}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{об2} k_{сн}} \right)^2, \quad (5-59)$$

где λ_1 и λ_2 — суммарные магнитные проводимости рассеяния обмоток статора и ротора соответственно:

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{s1} + \lambda_{z1};$$

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{s2} + \lambda_{z2} + \lambda_{сн}.$$

а) Пазовое рассеяние

Магнитная проводимость пазового рассеяния $\lambda_{п}$ для диаметральных обмоток зависит только от геометрических размеров паза. Значение $\lambda_{п}$ определяется по пото-

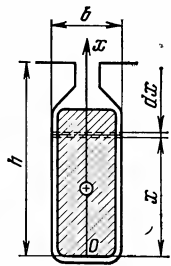


Рис. 5-5. Поле рассеяния паза.

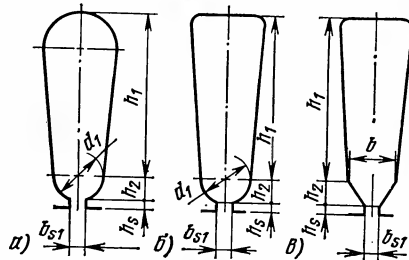


Рис. 5-6. Трапециевидные пазы статора.

косцеплению линий магнитной индукции поля рассеяния, проходящих поперек паза (рис. 5-5), с проводниками, лежащими в пазу. При этом полагают, что магнитным сопротивлением стали можно пренебречь:

$$\lambda_{п} = \int_0^h H_x^2 b_x dx, \quad (5-60)$$

где H_x — напряженность магнитного поля рассеяния в точке с координатой x при м. д. с. в паду, равной 1 А; b_x — ширина паза на высоте x ; h — полная высота паза.

В табл. 5-4 приведены расчетные формулы магнит-

Паз статора (ротора)	$\lambda_{п}$, Гн/м
Рис. 5-6, а, б Рис. 5-9, а	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[\frac{h_1}{3d_1} k'_\beta + \left(0,785 - \frac{b_s}{2d_1} + \frac{h_s}{b_s} \right) k''_\beta \right]$
Рис. 5-6, в Рис. 5-9, б	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[\frac{h_1}{3b} k'_\beta + \left(\frac{3h_2}{b+2b_s} + \frac{h_s}{b_s} \right) k''_\beta \right]$
Рис. 5-7, а Рис. 5-9, в	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[\frac{h_1 - h_4}{3b} k'_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_3}{b+2b_s} + \frac{h_s}{b_s} \right) k''_\beta + \frac{h_4}{4b} \right]$
Рис. 5-7, б	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{h_1 - h_4}{3b} k'_\beta + \frac{h_2}{b} k''_\beta + \frac{h_4}{4b} \right)$
Рис. 5-8, а	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(0,785 - \frac{b_{s2}}{2d_1} + \frac{h_s}{b_{s2}} \right)$
Рис. 5-8, б, в	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_s}{b_{s2}} \right]$
Рис. 5-8, г	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_2}{b+2b_{s2}} + \frac{h_s}{b_{s2}} \right)$
Рис. 5-8, д	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + 0,3 + 1,12 \frac{h_s}{I_2^*} \cdot 10^6 \right]$
Рис. 5-8, е	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{h_0 - 0,5d_1}{3d_1} + \frac{h_1 - 0,5d_2}{1,5(b + d_2)} + \frac{h_s}{b_{s2}} \right]$

* I_2 — ток стержня.

ной проводимости пазового рассеяния для выпных статорных обмоток (рис. 5-6), статорных обмоток с жесткими секциями (рис. 5-7), короткозамкнутых ро-

торных обмоток с литой клеткой (рис. 5-8) и обмоток фазных роторов (рис. 5-9) со всыпными и стержневыми обмотками.

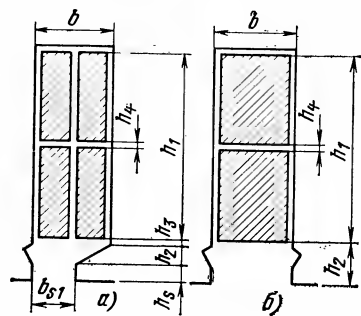


Рис. 5-7. Прямоугольные пазы статора.

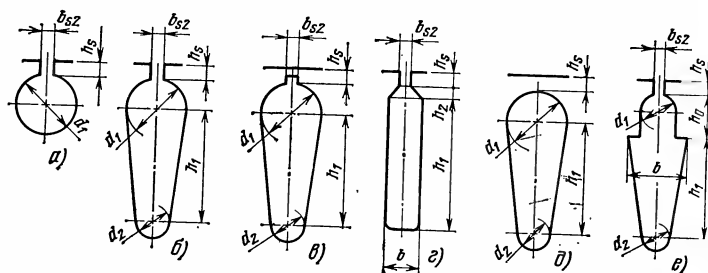


Рис. 5-8. Пазы короткозамкнутых роторов с одной клеткой.

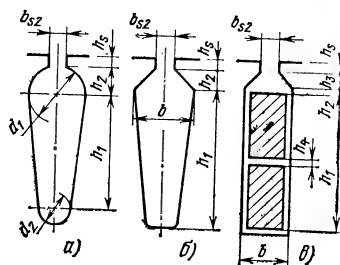


Рис. 5-9. Пазы фазных роторов.

При двухслойных обмотках с укороченным шагом в ряде пазов находятся стороны катушек, принадлежащих обмоткам разных фаз, что ведет к уменьшению потоко-сцепления. Это уменьшение потоко-сцепления учитыва-ется коэффициентом k'_β и k''_β .

Таблица 5-5

Вид обмотки в долях полного деления β_y	k''_β для обмоток с фазной зоной	
	$\pi/3$	$2\pi/3$
$2/3 \leq \beta_y \leq 1$ $1/3 \leq \beta_y \leq 2/3$	$0,25 + 0,75\beta_y$ $1,5\beta_y - 0,5$	$0,75$ $1,125\beta_y$

Коэффициент k'_β определяется по формуле

$$k'_\beta = 0,25 + 0,75k''_\beta, \quad (5-61)$$

k''_β — по табл. 5-5.

В) Рассеяние лобовых частей

Магнитная проводимость рассеяния лобовых частей обмотки статора λ_{s1} зависит от вида обмотки, длины лобовых частей, укорочения шага, взаимного расположе-ния элементов в лобовых частях и определяется выра-жением

$$\lambda_{s1} = k_s \frac{q_i}{l_i} (l_{л1} - 0,64\beta_y \tau) \cdot 10^{-6}. \quad (5-62)$$

Магнитная проводимость рассеяния лобовых частей обмотки фазного ротора λ_{s2} определяется аналогично.

Значение коэффициента k_s для различных видов трехфазных статорных и роторных обмоток приводится в табл. 5-6.

Таблица 5-6

Вид обмотки	k_s
Двухслойная статора или ротора, однослойная цепная,	0,42
однослойная вразвалку, фазная зона $\pi/3$	0,32
То же при фазной зоне $2\pi/3$	0,59
Однослойная концентрическая трехплоскостная	0,84
Однослойная двухплоскостная	

Магнитная проводимость рассеяния короткозамкнутых колец литой клетки ротора

$$\lambda_{s2} = \frac{2,9D_R}{z_2 l_2 \Delta^2} \lg \frac{4,7D_R}{a_R + 2b_R} \cdot 10^{-6}, \quad (5-63)$$

в) Дифференциальное рассеяние

Высшие гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, созданные высшими гармониками м. д. с. статора, наводят в его обмотке э. д. с. основной частоты, а в обмотке ротора при его вращении — э. д. с. высоких частот, т. е. не участвуют в передаче энергии от статора к ротору, поэтому их потокосцепления с обмоткой статора можно рассматривать как потокосцепления поля рассеяния высших гармонических — дифференциального рассеяния. Аналогичные выводы могут быть получены применительно к обмотке ротора. Электродвижущая сила обмотки от высших гармоник, а следовательно, и поле дифференциального рассеяния определяются порядком гармонических поля и их обмоточными коэффициентами, т. е. зависят от параметров обмотки, соотношения числа пазов статора и ротора, скоса пазов, воздушного зазора и некоторых соотношений размеров паза. Магнитная проводимость дифференциального рассеяния обмотки статора или ротора

$$\lambda_{z1(2)} = \frac{t_{1(2)}}{9,5\delta k_\delta} \xi_{\Delta 1(2)} \cdot 10^{-6}, \quad (5-64)$$

где ξ_Δ — коэффициент дифференциального рассеяния,

$$\xi_{\Delta 1} = k_p'' (1 - \Delta_{z1}) \text{ при } \alpha_z \geq 1;$$

$$\xi_{\Delta 1} = k_p'' (2\alpha_z - \alpha_z^2 - \Delta_{z1}/\alpha_z) \text{ при } \alpha_z < 1;$$

$$\xi_{\Delta 2} = 1 - \Delta_{z2},$$

α_z — коэффициент, зависящий от соотношения числа пазов статора и ротора и скоса пазов $\beta_{ск}$,

$$\alpha_z = \sqrt{(z_1/z_2)^2 + \beta_{ск}^2}; \quad (5-65)$$

Δ_z — коэффициент, зависящий от соотношений воздушного зазора δ , открытия паза b_s и зубцового шага t :

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{z1} &= (k_{\delta 1} - 1) - k_{\delta 1} \left[1,5 \left(\frac{b_{s1}}{t_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta}{t_1} \right)^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(b_{s1}/t_1)^2}{1 + 0,08 \frac{b_{s1}}{\delta}} \right]; \\ \Delta_{z2} &= k_{\delta 2} \left[1 - 1,5 \left(\frac{b_{s2}}{t_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\delta}{t_2} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(b_{s2}/t_2)^2}{1 + 0,08 \frac{b_{s2}}{\delta}} \right] - 1. \end{aligned} \right\} \quad (5-66)$$

Для закрытых пазов ($b_s=0$), а также при $\Delta_z < 0$ принимать $\Delta_z=0$.

г) Рассеяние скоса пазов

Уменьшение взаимной индукции между обмотками статора и ротора вследствие скоса пазов может рассматриваться как действие поля рассеяния скоса, которое возникает за счет основного поля машины. Магнитная проводимость рассеяния скоса пазов зависит от зубцового шага, скоса, соотношения числа пазов статора и ротора и эквивалентного воздушного зазора. При расчете рассеяния скоса пазов, в отличие от дифференциального рассеяния, необходимо учитывать насыщение магнитной цепи:

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2 \beta_{ск}^2}{9,5\delta k_\delta k_\mu} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 \cdot 10^{-6}. \quad (5-67)$$

5-5. ПОТЕРИ И К. П. Д.

Потери в меди обмотки статора $P_{м1}$ и обмотки ротора $P_{м2}$ определяются по формулам:

$$P_{м1} = 3I_1^2 r_1; \quad (5-68)$$

$$P_{м2} = 3I_2^2 r_2'. \quad (5-69)$$

Потери в стали при холостом ходе трехфазных асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт с полупазными пазами статора, сердечники которых собраны

из изолированных листов электротехнической стали, определяются по [41]:

$$P_c = P_{a1} + P_{z1} \left[1 + 20 \sqrt{t_1 (k_8 - 1)^3} \right], \quad (5-70)$$

где P_{a1} — потери в стали спинки статора,

$$P_{a1} = 1,6 p_{1,0/50} B_{a1}^2 m_{a1} \sqrt{(f/50)^3}; \quad (5-71)$$

P_{z1} — потери в стали зубцов статора,

$$P_{z1} = 1,8 p_{1,0/50} B_{z1}^2 m_{z1} \sqrt{(f/50)^3}; \quad (5-72)$$

$p_{1,0/50}$ — удельные потери в стали (значения удельных потерь для марок электротехнических сталей, применяемых в двигателях общего назначения, приведены в гл. 14); m_{a1} , m_{z1} — расчетная масса спинки и зубцов статора соответственно.

Формула (5-70) учитывает как основные, так и добавочные потери в стали при холостом ходе двигателя.

Для асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт с полукоткрытыми или открытыми пазами статора методикой завода «Электросила» рекомендуется потери в стали определять по формуле

$$P_c = c_c p_{1,0/50} (m_{a1} B_{a1}^2 + m_{z1} B_{z1}^2), \quad (5-73)$$

где c_c — коэффициент, зависящий от формы пазов статора и ротора, $c_c = 2$ при полукоткрытом пазе статора и полукоткрытом пазе короткозамкнутого и фазного ротора; $c_c = 2,7 \div 3,0$ при открытом пазе статора и короткозамкнутом роторе с $0,8 z_1 \leq z_2 \leq 1,25 z_1$.

Механические потери $P_{мех}$ асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 при $D_{a1} < 0,5$ м [41]

$$P_{мех} = k_T \left(\frac{n_c}{1000} \right)^2 D_{a1}^4 \cdot 10^3, \quad (5-74)$$

где $k_T = 1,3(1 - D_{a1})$ при $2p = 2$ и $k_T = 1$ при $2p > 2$. При $D_{a1} \geq 0,5$ м механические потери могут быть определены по методике ЛЭО «Электросила»:

$$P_{мех} = k_T D_{a1}^3. \quad (5-75)$$

Значение k_T зависит от числа полюсов:

$2p$	2	4	6	8	10	12
k_T	36,5	15,0	7,0	3,5	2,0	2,0

Механические потери двигателей со степенью защиты IP23 (22) и способом охлаждения IC01 при радиальной вентиляции без радиальных каналов с вентиляционными лопатками на торцах ротора рекомендуется определять по [41]:

$$P_{мех} = k_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 D_{a1}^3 \cdot 10^3. \quad (5-76)$$

Для $2p = 2$ $k_T = 6$ при $D_{a1} > 0,25$ м, $k_T = 5$ при $D_{a1} \leq 0,25$; для $2p > 2$ $k_T = 7$ при $D_{a1} > 0,25$ м, $k_T = 6$ при $D_{a1} \leq 0,25$ м.

Условные добавочные потери асинхронных двигателей P_d в соответствии с ГОСТ 11828-75 принимаются равными 0,5% потребляемой мощности P_1 . Вопросы расчета фактических добавочных потерь изложены в гл. 7.

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя определяется по формуле

$$\eta = 1 - \Sigma P / P_1, \quad (5-77)$$

где $\Sigma P = P_{м1} + P_{м2} + P_c + P_{мех} + P_d$.

5-6. РАСЧЕТ АКТИВНОГО И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА С УЧЕТОМ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В СТЕРЖНЯХ

Вытеснение тока в стержнях ротора приводит к увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивлений обмотки.

По методу, предложенному Ф. Эмде [44], активное сопротивление прямоугольного стержня рассчитывается по условной глубине проникновения тока h_r , а индуктивное сопротивление — по глубине h_x . Величины h_r и h_x определяются по формулам:

$$h_r = h_2 / \varphi(\xi); \quad h_x = h_2 \varphi'(\xi), \quad (5-78)$$

где h_2 — полная высота проводника (стержня) ротора;

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (5-79)$$

$$\varphi'(\xi) = \frac{3}{2\xi} \frac{\operatorname{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (5-80)$$

ξ — безразмерная величина, называемая приведенной высотой проводника (стержня),

$$\xi = h_2 \sqrt{\frac{\omega_2 \mu_0 \gamma}{2} \frac{b_2}{b_n}} = 2\pi h_2 \sqrt{f_2 \gamma \frac{b_2}{b_n} 10^{-7}}; \quad (5-81)$$

b — ширина стержня; b_n — ширина паза.

При частоте тока статора 50 Гц и литой клетке ротора ($b_2 = b_n$) формула (5-81) примет вид:

$$\xi = 1,4 \cdot 10^{-2} h_2 \sqrt{\gamma s} = k_\xi h_2 \sqrt{s}. \quad (5-81a)$$

Для клетки ротора, залитой алюминием, $k_\xi = 70$ 1/м при расчетной рабочей температуре 75°C и $k_\xi = 66,5$ 1/м при температуре 115°C.

Как видно из рис. 5-10, при $\xi > 2,4$ $\varphi(\xi) \approx \xi$, а $\varphi'(\xi) \approx 1,5/\xi$. В этом случае формулы (5-78), определяющие условную глубину проникновения тока в стержень, преобразуются:

$$h_r = 1/k_\xi \sqrt{s}; \quad h_x = 1,5/k_\xi \sqrt{s} = 1,5h_r.$$

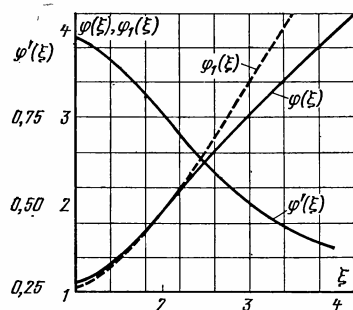


Рис. 5-10. Зависимости $\varphi(\xi)$, $\varphi'(\xi)$, $\varphi_1(\xi)$.

Вышеприведенными формулами можно пользоваться для стержней любой формы. При стержнях ступенчатой формы с резкими переходами на границе ступеней определенные по формулам

Таблица 5-7

Отношение ширины стержня в месте резкого перехода	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
C_ξ	1	0,97	0,954	0,936	0,925	0,915	0,905

(5-78) значения h_r и h_x следует умножить на поправочный коэффициент C_ξ , значения которого приведены в табл. 5-7.

Для двигателей с круглым пазом ротора (см. рис. 5-8, а) активное сопротивление $r'_{2\xi}$ с учетом вытеснения тока равно:

$$r'_{2\xi} = \{(r_c + r_R) + r_c [\varphi_1(\xi) - 1]\} \frac{4m_1 w_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{0\sigma 1}}{k_{CK}} \right)^2. \quad (5-82)$$

Зависимость $\varphi_1(\xi)$ показана на рис. 5-10.

Параметр ξ определяется по формулам (5-81), при этом вместо ширины стержня b_2 подставляется его диаметр d .

Для двигателей с глубоким пазом прямоугольной, овальной, трапецидальной форм (рис. 5-8, б — д), а также с бутылочными пазами (рис. 5-8, е) активное сопротивление ротора с учетом вытеснения тока определяется по формуле

$$r'_{2\xi} = \left[(r_c + r_R) + r_c \left(\frac{q_c}{q_r} - 1 \right) \right] \frac{4m_1 w_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{0\sigma 1}}{k_{CK}} \right)^2, \quad (5-82a)$$

где q_r — площадь сечения, соответствующая высоте h_r .

Таблица 5-8

Паз ротора	$\lambda_{п2\xi}$, Гн/м
Рис. 5-8, а	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[\left(0,785 - \frac{b_s}{2d} \right) \varphi'(\xi) + \frac{h_s}{b_{s2}} \right]$
Рис. 5-8, б, в	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{2(h_x - 0,5d_1)}{3(d_1 + d_x^*)} + \frac{h_s}{b_{s2}} \right]$
Рис. 5-8, г	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{h_x}{3b} + \frac{3h_2}{b + 2b_{s2}} + \frac{h_{s2}}{b_{s2}} \right)$
Рис. 5-8, д	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{2(h_x - 0,5d_1)}{3(d_1 + d_x^*)} + \right.$ $\left. + 0,3 + 1,12 \frac{h_s}{I_2} \cdot 10^6 \right]$
Рис. 5-8, е	$0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{h_x - 0,5d_1}{3d_1} + \frac{h_{s2}}{b_{s2}} \right]$

* d_x — ширина паза на высоте h_x .

Индуктивное сопротивление ротора $x'_{2\xi}$ с учетом вытеснения тока равно:

$$x'_{2\xi} = x'_2 \frac{\lambda_{2\xi}}{\lambda_2}, \quad (5-83)$$

где $\lambda_{2\xi}$ — суммарная магнитная проводимость рассеяния обмотки ротора с учетом вытеснения тока при расчете магнитной проводимости пазового рассеяния $\lambda_{п2\xi}$,

$$\lambda_{2\xi} = \lambda_{п2\xi} + \lambda_{s2} + \lambda_{z2} + \lambda_{ск}. \quad (5-84)$$

Параметр $\lambda_{п2\xi}$ определяется по табл. 5-8.

5.7. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАССЕЯНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ ОТ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ

При расчете магнитной проводимости потоков рассеяния (см. § 5-4) для упрощения предполагалось, что магнитная проницаемость стали бесконечно велика ($\mu_c = \infty$). Однако при больших токах в диапазоне скольжений $s = s_{кр}$ (максимальный момент) до $s = 1$ (пусковой режим) в ферромагнитных участках, по которым протекают потоки рассеяния, возникает насыщение, которое уменьшает потоки рассеяния, а следовательно, и индуктивные сопротивления, ими обусловленные. В первую очередь это относится к пазовому и дифференциальному рассеянию.

Физические явления, связанные с насыщением отдельных участков магнитной цепи, весьма сложны. Все предложенные способы учета этих явлений являются приближенными, основанными на упрощенных моделях. Одним из таких способов является метод эквивалентного открытия паза [41].

а) Метод эквивалентного открытия паза

В соответствии с этим методом насыщение путей рассеяния по головкам зубцов учитывается дополнительным открытием пазов, приводящим к эквивалентному уменьшению индуктивного сопротивления рассеяния.

Эквивалентное открытие паза определяется по формуле

$$\Delta b_s = (b - b_s) \frac{1/k_c - 1,6 \cdot 10^6 b_s / F_{п}}{1 + 1,6 \cdot 10^6 (b - b_s) / F_{п}}, \quad (5-85)$$

где $F_{п}$ — расчетная м. д. с. пазов статора и ротора,

$$F_{п} = k_p \frac{w_1 k_{об1} I'_2 k_N}{0,37p}; \quad (5-86)$$

I'_2 — ток ротора в рассматриваемом режиме без учета насыщения путей потоков рассеяния; k_N — коэффициент насыщения, предварительное значение которого принимается равным для пускового режима 1,3—1,4; для режима максимального момента 1,15—1,25.

Значение коэффициента k_p приведено в табл. 5-9.

Таблица 5-9

$D_{a1}, \text{ м}$	k_p				
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=12$
Меньше 0,3	$0,5 \sqrt{\frac{z_1}{z_2}}$	$\sqrt{\frac{z_1}{z_2}}$	$1,8 \sqrt{\frac{z_1}{z_2}}$	—	—
Больше 0,3	0,5	0,5	1,0	1,0	2,5

Для открытых пазов

$$k_p = \frac{0,16 t_1}{\delta q_1} \sqrt{\frac{z_1}{z_2}}. \quad (5-87)$$

Уменьшение проводимости пазового рассеяния определяется по следующим формулам:

1) для пазов на рис. 5-6, в, 5-7, а; 5-8, г и 5-9, б, в

$$\Delta \lambda_{п} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} k_p'' \left(\frac{h_s}{b_s} \frac{\Delta b_s}{\Delta b_s + b_s} + \frac{3h_2}{b + \Delta b_s} \frac{\Delta b_s}{\Delta b_s + b_s + b/2} \right); \quad (5-88a)$$

2) для пазов на рис. 5-6, а, б, 5-8, а-в, е и 5-9, а

$$\Delta \lambda_{п} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} k_p'' \left(\frac{h_s}{b_s} \frac{\Delta b_s}{\Delta b_s + b_s} + \frac{\Delta b_s}{2d_1} \right); \quad (5-88б)$$

3) для пазов на рис. 5-7, б

$$\Delta \lambda_{п} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} k_p'' \frac{h_2}{b} \frac{\Delta b_s}{\Delta b_s + b}. \quad (5-88в)$$

Для закрытых пазов ротора (см. рис. 5-8, д) проводимость пазового рассеяния с учетом насыщения определяется по табл. 5-4 для тока ротора

$$I_2 = I'_2 k_N \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{z_2 k_{ск}}. \quad (5-89)$$

Таким образом, проводимость пазового рассеяния $\lambda_{пN}$ с учетом насыщения

$$\lambda_{пN} = \lambda_{п} - \Delta\lambda_{п}. \quad (5-90)$$

Магнитная проводимость дифференциального рассеяния с учетом насыщения определяется по формуле

$$\lambda_{zN1(2)} = \lambda_{z1(2)} / k_{\lambda z}, \quad (5-91)$$

где $k_{\lambda z}$ — коэффициент уменьшения проводимости дифференциального рассеяния,

$$k_{\lambda z} = \left(1 + \frac{\Delta b_{s1}}{b_{s1} + 5\delta}\right) \left(1 + \frac{\Delta b_{s2}}{b_{s2} + 5\delta}\right). \quad (5-92)$$

Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора с учетом насыщения

$$x_{1N} = x_1 \frac{\lambda_{1N}}{\lambda_1}; \quad (5-93)$$

$$x'_{2N} = x_2 \frac{\lambda_{2N}}{\lambda_2}, \quad (5-94)$$

$$\text{где } \lambda_{1N} = \lambda_{п1N} + \lambda_{s1} + \lambda_{z1N};$$

$$\lambda_{2N} = \lambda_{п2N} + \lambda_{s2} + \lambda_{z2N} + \lambda_{ск}.$$

Если найденное по (5-25) с учетом насыщения значение тока отличается более чем на 15% предварительного I'_{2kN} , расчет следует повторить. При закрытых пазах ротора на новое значение тока пересчитывается также и проводимость пазового рассеяния ротора.

б) Другие методы учета насыщения

Для серии асинхронных двигателей, характерной подобием геометрии активных частей, в [48] предложен метод учета насыщения, основанный на анализе зависимости изменения реактивного сопротивления двигателя $x_{кр}$ от тока I_1 . Индуктивное сопротивление двигателя можно представить как

$$x_{кр} \approx x_1 + x'_2 = 4\pi f_1 \omega_1^2 \frac{l_1}{pq_1} \lambda_{кр},$$

где

$$\lambda_{кр} = \lambda_1 + \lambda_2 \frac{l_2}{l_1} \frac{z_1}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}}\right)^2.$$

Зависимость $\lambda_{кр}$ от тока может быть представлена так

$$\lambda_{кр} = a + b/\sqrt[3]{I_{1*}}, \quad (5-95)$$

где $I_{1*} = I_1/I_{ном}$ — относительное значение тока статора, значения коэффициентов a и b могут быть найдены по результатам испытаний ряда двигателей данной серии.

Отметим, что при $I_{1*} = 1$, т. е. при $I_1 = I_{ном}$,

$$\lambda_{кр} = a + b.$$

Заслуживает внимания также метод, предложенный Б. Чалмерсом — Р. Додгсоном [49], основанный на сопоставлении потоков рассеяния насыщенной и ненасыщенной машин.

6-8. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЕЙ С ДВОЙНОЙ КЛЕТКОЙ РОТОРА

а) Схема замещения ротора и ее параметры

Двойная клетка ротора применяется для увеличения начального пускового момента и снижения начального пускового тока и может быть выполнена в двух вариантах: двойными пазами и с

чередующимися простыми пазами разной формы. Форма пазов рабочей и пусковой клеток может быть разнообразной. Нами будут рассмотрены наиболее распространенные для двигателей общего назначения конструкции: двойная клетка с двойными пазами — круглым (пусковая клетка) и овальным, трапециевидным (рабочая клетка) (рис. 5-11, а); двойная клетка с чередующимися круглыми (пусковая клетка) и «бутылочными» (рабочая клетка) пазами (рис. 5-11, б). При этом в обоих случаях пусковая и рабочая клетки имеют общие короткозамыкающие кольца.

На схеме замещения (рис. 5-12), справедливой для обеих конструкций, индексом «п» обозначены парамет-

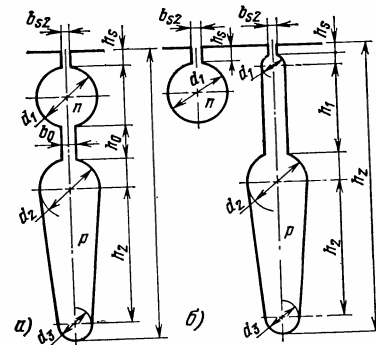


Рис. 5-11. Пазы ротора с двойной клеткой.

ры пусковой клетки, индексом «р» — параметры рабочей клетки, а индексом «о» — параметры цепи, общей для пусковой и рабочей клеток.

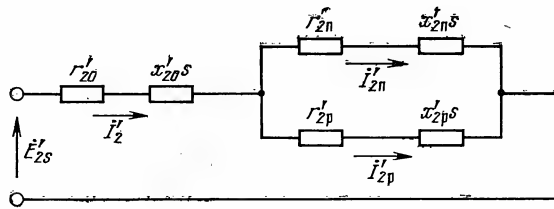


Рис. 5-12. Схема замещения ротора с двойной клеткой.

Исходя из принятой схемы замещения, формулы для результирующих параметров — активного и индуктивного сопротивлений ротора, приведенных к обмотке статора, будут иметь вид:

$$r'_2 = r'_{20} + a_r \frac{1 + b_r s^2}{1 + cs^2}; \quad (5-96)$$

$$x'_2 = x_{20} + a_x \frac{1 + b_x s^2}{1 + cs^2}, \quad (5-97)$$

где

$$a_r = \frac{r'_{2п} r_{2п}}{r'_{2п} + r_{2п}}; \quad (5-98)$$

$$b_r = \frac{r'_{2п} x_{2п}^2 + r'_{2п} x_{2п}^2}{r'_{2п} r_{2п}^2 + r'_{2п} r_{2п}^2}; \quad (5-99)$$

$$a_x = \frac{x'_{2п} r_{2п}^2 + x'_{2п} r_{2п}^2}{(r'_{2п} + r_{2п})^2}; \quad (5-100)$$

$$b_x = \frac{x'_{2п} x_{2п}^2 + x'_{2п} x_{2п}^2}{x'_{2п} r_{2п}^2 + x'_{2п} r_{2п}^2}; \quad (5-101)$$

$$c = \left(\frac{x'_{2п} + x_{2п}}{r'_{2п} + r_{2п}} \right)^2. \quad (5-102)$$

В рабочем режиме при малых скольжениях членами, содержащими s^2 можно пренебречь. Тогда

$$r'_{2п} = r'_{20} + a_r; \quad (5-96a)$$

$$x'_{2п} = x'_{20} + a_x. \quad (5-97a)$$

Для двигателей с общими короткозамыкающими кольцами при радиальном расположении клеток (см. рис. 5-11, а) индуктивным сопротивлением пусковой клетки можно пренебречь [50], т. е. $x'_{2п} = 0$. Тогда выражения для коэффициентов b_r , a_x , b_x и c упрощаются и принимают вид:

$$b_r = \frac{r'_{2п} x_{2п}^2}{r'_{2п} r_{2п}^2 + r'_{2п} r_{2п}^2}; \quad (5-99a)$$

$$a_x = \frac{x_{2п}^2 r_{2п}}{(r'_{2п} + r_{2п})^2}; \quad (5-100a)$$

$$b_x = 0; \quad (5-101a)$$

$$c = \frac{x_{2п}^2}{(r'_{2п} + r_{2п})^2}. \quad (5-102a)$$

б) Расчет параметров схемы замещения для рабочего режима

Параметры схемы замещения в рабочем режиме (без учета вытеснения тока) найдутся по формулам:

$$r'_{2п} = r_{с,п} \frac{4m_1 \omega_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2; \quad (5-103)$$

$$r'_{2р} = r_{с,р} \frac{4m_1 \omega_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2; \quad (5-104)$$

$$r'_{20} = r_R \frac{4m_1 \omega_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2; \quad (5-105)$$

$$x_{2п} = x_1 \frac{\lambda_{2п} l_2 z_1}{\lambda_1 l_1 z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2; \quad (5-106)$$

$$x'_{2п} = x_1 \frac{\lambda_{2п} l_2 z_1}{\lambda_1 l_1 z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2; \quad (5-107)$$

$$x'_{20} = x_1 \frac{\lambda_{20} l_2 z_1}{\lambda_1 l_1 z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2, \quad (5-108)$$

где $r_{с,п}$ и $r_{с,р}$ — активные сопротивления стержней пу-

сковой и рабочей клеток (5-56); r_R — активное сопротивление короткозамыкающего кольца, приведенное к стержню (5-57); при расчете параметров ротора с чередующимися пазами (см. рис. 5-11, б) в (5-103) — (5-108) число пазов ротора принимается равным $z_2/2$; $\lambda_{2п} = \lambda_{п,п}$ — проводимость потока пазового рассеяния пусковой клетки (для роторов с чередующимися пазами), определяется по табл. 5-4 для круглого паза (см. рис. 5-8, а); $\lambda_{2р} = \lambda_{п,р}$ — проводимость потока пазового рассеяния рабочей клетки. Для клетки на рис. 5-11, а

$$\lambda_{п,р} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{2h_2}{3(d_2 + d_3)} + \frac{h_0}{b_0} \right]; \quad (5-109)$$

для клетки по рис. 5-11, б

$$\lambda_{п,р} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[0,66 + \frac{2h_2}{3(d_2 + d_3)} + \frac{h_1}{d_1} + \frac{h_s}{b_s} \right]; \quad (5-110)$$

$$\lambda_{20} = \lambda_{п,п} + \lambda_{22} + \lambda_{s2} + \lambda_{ск}, \quad (5-111)$$

где $\lambda_{п,п}$ — проводимость потока рассеяния взаимной индукции рабочей и пусковой клеток. Для роторов с двойной клеткой (см. рис. 5-11, а) $\lambda_{п,п}$ определяется по табл. 5-4 для круглого паза (см. рис. 5-8, а) с диаметром, равным диаметру паза пусковой клетки. Для роторов с чередующимися пазами разной формы (см. рис. 5-11, б) $\lambda_{п,п} = 0$.

в) Расчет параметров схемы замещения с учетом вытеснения тока в стержнях ротора

Параметры схемы замещения — активные и индуктивные сопротивления с учетом вытеснения тока для роторов с чередующимися пазами (см. рис. 5-11, б) определяются раздельно для каждой из клеток по формулам, приведенным в предыдущих разделах. Параметры схемы замещения с учетом вытеснения тока для роторов с двойной клеткой (рис. 5-11, а) определяются по формулам:

$$r'_{2п\xi} = r'_{2п} [\varphi_1(\xi) - \psi(\xi)]; \quad (5-112)$$

$$r'_{2р\xi} = r'_{2р} \left[\frac{q_{с,р}}{q_{с,пр}} + \frac{r_{с,п}}{r_{с,р}} \psi(\xi) \right]; \quad (5-113)$$

$$r'_{20\xi} = r'_{20} + r'_{2п} \psi(\xi); \quad (5-114)$$

$$x'_{2р\xi} = x'_{2р} \frac{\lambda_{2р\xi}}{\lambda_{2р}}; \quad (5-115)$$

$$x'_{20\xi} = x'_{20} \frac{\lambda_{20\xi}}{\lambda_{20}}; \quad (5-116)$$

$$\lambda_{п,р} = \lambda_{п,р\xi} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left\{ \left[0,66 + \frac{2h_2}{3(d_2 + d_3)} \right] \varphi'(\xi) + \frac{h_0}{b_0} \right\}; \quad (5-117)$$

$$\lambda_{20\xi} = \lambda_{п,р\xi} + \lambda_{22} + \lambda_{s2} + \lambda_{ск}; \quad (5-118)$$

$$\lambda_{п,р\xi} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left[\left(0,785 - \frac{b_s}{2b} \right) \psi(\xi) + \frac{h_s}{b_s} \right], \quad (5-119)$$

где $q_{с,р}$ — площадь сечения стержня рабочей клетки, ограниченная высотой h_r (определяемой для этого стержня). Зависимости $\psi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ показаны на рис. 5-13.

При заливке алюмином ротора с двойной клеткой (см. рис. 5-11, а) пусковой и рабочей стержни оказываются соединенными между собой проводящим металлическим мостиком. Р. Рихтер [39] отмечал, что наличие такого мостика приводит к тому, что по своим рабочим свойствам такой ротор с двойной клеткой приближается к ротору с глубоким пазом. И действительно, испытания подобных двигателей дают результаты, значительно отличающиеся от данных, рассчитанных по вышеприведенным формулам. Большая сходимость с опытными данными получается, если представить паз двойной клетки, залитый алюминием, как глубокий паз сложной формы и определять параметры ротора r'_2 и x'_2 , исходя из этого предположения, по формулам (5-3), (5-4) и (5-6).

В табл. 5-10 приводятся данные испытаний двигателя 4А180М4, 30 кВт, 1500 об/мин с клеткой (см. рис. 5-11, а), залитой алюминием, а также данные расчета этого двигателя в двух вариантах:

1 — параметры ротора определялись по формулам § 5-8.

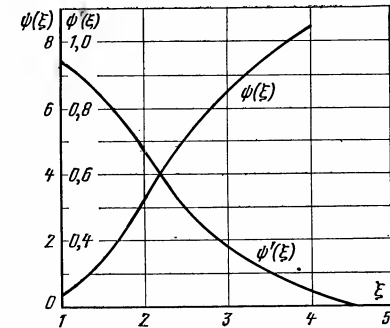


Рис. 5-13. Зависимости $\psi(\xi)$, $\varphi'(\xi)$.

Таблица 5-10

Таблица 3-1

Параметр	Значения параметров			Параметр	Значения параметров		
	по опыту	по расчету			по опыту	по расчету	
		вариант-I	вариант-II			вариант I	вариант II
$r_2', \text{ Ом}$	—	0,072	0,067	$I_{\Pi}/I_{\text{ном}}$	5,7	6,7	5,3
$r_{2\xi}, \text{ Ом}$	—	0,152	0,167	$M_{\Pi}/M_{\text{ном}}$	1,5	1,9	1,3
$x_2', \text{ Ом}$	—	0,549	0,642	$M_{\text{кр}}/M_{\text{ном}}$	2,2	2,7	2,4
$x_{2\xi N}, \text{ Ом}$	—	0,251	0,438				

II — параметры ротора определялись по формулам § 5-3, 5-4 и 5-6 с учетом коэффициентов, приведенных в табл. 5-7.

5-9. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЕЙ С МАГНИТНЫМИ КЛИНЬЯМИ

Для асинхронного двигателя с магнитными клиньями в пазах статора (ротора) действительна та же схема замещения, что и для обычного двигателя с немагнитными клиньями. Однако магнитный клин существенно изменяет структуру магнитного поля в воздушном зазоре и в области паза, занятой клином. Это обстоятельство вносит особенности в расчет коэффициента воздушного зазора k_{δ} и магнитной проводимости пазового λ_{Π} и дифференциального λ_z рассеяний. Вывод необходимых формул в общем случае требует решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих магнитное поле в воздушном зазоре и магнитном клине, поскольку магнитные проницаемости стали сердечника и магнитного клина зависят от напряженности магнитного поля. Однако для практически важного случая открытого паза и магнитного клина, расположенного заподлицо с поверхностью статора (ротора), можно получить достаточно простое и удовлетворительное решение поставленной задачи при следующих допущениях:

1) так как даже в электрических машинах без магнитных клиньев основной магнитный поток проникает в

паз только на глубину, равную половине открытия паза, а магнитная индукция над зубцом практически выравнивается на расстоянии от стенки паза, равном воздушному зазору, то можно считать, что в формировании магнитного поля над пазом и магнитным клином участвует только область, занятая клином, и что магнитная индукция над зубцом постоянна;

2) так как воздушный зазор δ и высота клина h_k малы по сравнению с размерами сердечника и пазов двигателя, то можно принять, что линии магнитной индукции в воздушном зазоре перпендикулярны поверхности ротора (статора) и магнитного клина, а в маг-

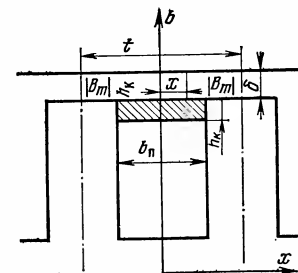


Рис. 5-14. Расчетная схема.

нитном клине параллельны поверхности клина, и не учитывать падение магнитного потенциала по высоте клина;

3) в магнитоэлектриках, рекомендуемых к применению в качестве магнитных клиньев, магнитная проницаемость слабо зависит от напряженности магнитного поля и в первом приближении можно принять, что магнитная проницаемость клина постоянна ($\mu_k = \text{const}$);

4) магнитная проницаемость материала магнитопровода бесконечно велика;

5) конечность длины и кривизны ротора и статора не учитываются;

6) поверхность ротора (статора), расположенная над пазом с магнитным клином, гладкая. Зубчатость этой поверхности приближенно учитывается коэффициентом воздушного зазора. Таким образом под воздушным зазором понимается физический воздушный зазор между ротором и статором, умноженный на коэффициент воздушного зазора для противоположной стороны;

7) поверхностные и гистерезисные явления в магнитопроводе и клине не учитываются.

Для магнитного потока $\Phi(x)$ и магнитного потенциала $F(x)$ в сечении клина x (рис. 5-14) могут быть записаны следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x) &= \Phi(0) - \varphi(x); \\ F(x) &= F(0) - G(x); \end{aligned} \right\} \quad (5-120)$$

здесь $\Phi(0)$, $F(0)$ магнитный поток и магнитный потенциал в сечении клина, расположенном в начале координат (на оси симметрии паза) соответственно; $\varphi(x)$ — магнитный поток, ответившийся на длине x с поверхности клина в ротор; $G(x)$ — падение магнитного потенциала в клине на длине x .

Переходя к индукции в воздушном зазоре $b(x)$ и клине $b_k(x)$, из уравнения (5-120) получим систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$b'_k(x) = -\frac{1}{h_k} b(x); \quad (5-121)$$

$$b_k(x) = -\mu_k \delta k_{\delta 2(1)} b'(x). \quad (5-122)$$

Общее решение системы уравнений (5-121) и (5-122) имеет вид:

$$b_k(x) = C \operatorname{ch}(kx) + D \operatorname{sh}(kx); \quad (5-123)$$

$$b(x) = -h_k k [C \operatorname{sh}(kx) + D \operatorname{ch}(kx)], \quad (5-124)$$

где

$$k = \frac{1}{\sqrt{h_k \delta k_{\delta 2(1)} \mu_k}}. \quad (5-125)$$

Постоянные интегрирования C и D определяются из граничных условий. Для паза, не занятого током, граничные условия имеют вид:

$$b|_{x=b/2} = b|_{x=-b/2} = B_m; \quad (5-126)$$

для паза, занятого током,

$$b|_{x=b/2} = -B_m; \quad (5-127)$$

$$b|_{x=-b/2} = B_m; \quad (5-128)$$

здесь B_m — магнитная индукция над зубцом.

С учетом условий (5-126) — (5-128) получаем из (5-123) и (5-124):

1) паз не занят током

$$b_{k1}(x) = -\frac{B_m}{kh_k \operatorname{ch} \frac{kb_{\Pi}}{2}} \operatorname{sh} kx; \quad (5-129)$$

$$b_1(x) = \frac{B_m}{\operatorname{ch} \frac{kb_{\Pi}}{2}} \operatorname{ch} kx, \quad (5-130)$$

2) паз занят током

$$b_{k11}(x) = \frac{B_m}{k \operatorname{sh} \frac{kb_{\Pi}}{2}} \operatorname{ch} kx; \quad (5-131)$$

$$b_{11}(x) = \frac{B_m}{\operatorname{sh} \frac{kb_{\Pi}}{2}} \operatorname{sh} kx. \quad (5-132)$$

Полученные уравнения, описывающие распределение магнитной индукции в воздушном зазоре и магнитном клине для паза без тока и паза с током, дают возможность вывести формулы для расчета коэффициентов воздушного зазора k_{δ} , магнитных проводимостей пазового λ_{Π} и дифференциального λ_z рассеяний.

Коэффициент воздушного зазора k_{δ} определяется как отношение магнитного потока на зубцовом делении t при отсутствии зубчатости к магнитному потоку при наличии зубчатости:

$$k_{\delta} = \frac{B_m t}{B_m(t - b_{\Pi}) + \int_{-b_{\Pi}/2}^{b_{\Pi}/2} B_{1*}(x) dx}. \quad (5-133)$$

Из (5-133) и (5-130) получим выражения для статора (ротора) с магнитными клиньями:

$$k_{\delta 1(2)} = \frac{t_{1(2)}}{t_{1(2)} - b_{\Pi 1(2)} + \frac{2}{k} \operatorname{th} \frac{kb_{\Pi 1(2)}}{2}}. \quad (5-134)$$

Так как принято, что магнитная проницаемость клина $\mu_k = \operatorname{const}$, то коэффициент проводимости потока рассеяния через магнитный клин λ_k можно рассматривать как коэффициент пропорциональности между м. д. с. паза и потоком рассеяния через клин:

$$\lambda_k = |\Phi_{\Pi}|/2F_{\Pi}\mu, \quad (5-135)$$

где Φ_{Π} — магнитный поток через клин в сечении $x=0$ для паза, занятого током; F_{Π} — м. д. с. паза.

Из (5-135) и (5-134) получим:

$$\lambda_k^* = \frac{1}{2\delta k_{\delta 2(1)} k \operatorname{sh}(kb_{\Pi}/2)}. \quad (5-136)$$

Интересно отметить, что при $\delta \rightarrow \infty$ и $\mu_k = 1$ формула (5-136) переходит в общепринятую формулу для

расчета коэффициента проводимости потока рассеяния клиновой части открытого паза (см. табл. 5-4)

$$\lambda' = h_k/b_{\Pi} = h_2/b.$$

Значение магнитной проводимости потока рассеяния через клин может быть найдено умножением коэффициента λ'_k (5-136) на μ_0 . Магнитную проводимость потока дифференциального рассеяния статора или фазного ротора при открытых пазах рекомендуется определять по формуле

$$\lambda_{z1(2)} = \frac{t_{1,2} k_{\delta 1(2)}^2}{9,56 k_{\delta 1} k_{\delta 2}} \left[1 + k_{\beta 1(2)}'' \left(\frac{z_{1(2)}}{10\rho} \right)^2 \right]. \quad (5-137)$$

Магнитная проводимость потока дифференциально-го рассеяния для короткозамкнутого ротора определяется по (5-64)—(5-66). При этом $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ в случае магнитного клина определяются по (5-134).

Глава шестая

РАСЧЕТ ПУСКА КОРОТКОЗАМКНУТЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

6-1. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Расчет пуска асинхронного двигателя включает в себя определение зависимости частоты вращения от времени в течение пуска, определение длительности пуска и потерь электроэнергии в статоре и роторе за время пуска.

Расчет пуска исходит из основного уравнения динамики электропривода: вращающий момент электродвигателя M в любом режиме (пуск, работа, торможение) равен сумме динамического $M_{\text{дин}}$ и статического $M_{\text{ст}}$ моментов сопротивления системы:

$$M = M_{\text{дин}} + M_{\text{ст}}. \quad (6-1)$$

В относительных единицах выражение (6-1) примет вид:

$$M_* = M_{\text{дин}*} + M_{\text{ст}*}, \quad (6-2)$$

где

$$M_* = M/M_{\text{ном}}; \quad M_{\text{дин}*} = M_{\text{дин}}/M_{\text{ном}}; \quad M_{\text{ст}*} = M_{\text{ст}}/M_{\text{ном}}; \quad (6-3)$$

$M_{\text{ном}}$ — номинальный момент.

Длительность пуска, потери и энергия, потребляемая при пуске, зависят от соотношения этих моментов, поэтому анализ следует начать с определения закономерностей, характеризующих указанные моменты.

6-2. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Вращающий момент асинхронного двигателя в первом приближении можно принять равным электромагнитному моменту, определяемому из формулы Клосса. Эта формула получена из Т-образной схемы замещения асинхронной машины с постоянными параметрами

$$M_* = \frac{s_{\text{ном}}/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s_{\text{ном}} + 2\rho s_{\text{кр}}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s + 2\rho s_{\text{кр}}}, \quad (6-4)$$

где s — текущее значение скольжения; $s_{\text{ном}}$ — номинальное скольжение $s_{\text{кр}}$ — критическое скольжение,

$$s_{\text{кр}} = c_1 r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}; \quad \rho = r_1/c_1 r_2'; \quad c_1 \approx 1 + x_1/x_{\mu}.$$

Максимальный момент

$$M_{\text{кр}*} = \frac{s_{\text{ном}}/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s_{\text{ном}} + 2\rho s_{\text{кр}}}{2(1 + \rho s_{\text{кр}})}. \quad (6-5)$$

Начальный пусковой момент

$$M_{\text{п}*} = \frac{s_{\text{ном}}/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s_{\text{ном}} + 2\rho s_{\text{кр}}}{1/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}(1 + 2\rho)}; \quad (6-6)$$

$$\frac{M_{\text{п}*}}{M_{\text{кр}*}} = \frac{2(1 + \rho s_{\text{кр}}) s_{\text{кр}}}{1 + s_{\text{кр}}^2 (1 + 2\rho)}. \quad (6-7)$$

Согласно (6-7) критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ может быть выражено через отношение $\frac{M_{\text{п}*}}{M_{\text{кр}*}}$ и параметр ρ :

$$s_{\text{кр}} = A \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_{\text{п}*}}{M_{\text{кр}*}} \frac{1}{A}} \right), \quad (6-8)$$

где

$$A = \frac{1}{(1 + 2\rho) \frac{M_{п*}}{M_{кр*}} - 2\rho}$$

Следует отметить, что значение ρ мало влияет на скольжение $s_{кр}$ (табл. 6-1).

Таблица 6-1

ρ	$s_{кр}$ при $M_{п*}/M_{кр*}$							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	0,139	0,186	0,236	0,290	0,360	0,438	0,545	1
1,32	0,136	0,181	0,229	0,283	0,355	0,422	0,542	1
1,5	0,128	0,178	0,225	0,277	0,340	0,418	0,537	1

Для двигателей серии 4А основного исполнения с высотами оси вращения $h = 56 \div 132$ мм, которые в известной мере ближе к двигателям с постоянными параметрами, целесообразно пользоваться усредненным значением ρ , равным 1,32.

Во многих случаях (6-4) упрощают, пренебрегая членом $2\rho s_{кр}$:

$$\left. \begin{aligned} M_* &= \frac{s_{ном}/s_{кр} + s_{кр}/s_{ном}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}; \\ M_{кр*} &= \frac{s_{ном}/s_{кр} + s_{кр}/s_{ном}}{1/s_{кр} + s_{кр}}; \end{aligned} \right\} \quad (6-9)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{п*} &= \frac{s_{ном}/s_{кр} + s_{кр}/s_{ном}}{1/s_{кр} + s_{кр}}; \\ \frac{M_{п*}}{M_{кр*}} &= \frac{2s_{кр}}{1 + s_{кр}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6-9a)$$

Таблица 6-2

$s_{кр}$	ρ	$2\rho s_{кр}$	$s_{кр}/s_{ном}$	$M_{кр*}$		Погрешность, %	$M_{п*}$		Погрешность, %
				(6-5)	(6-9)		(6-6)	(6-9a)	
0,1	1,2	0,24	5,00	2,6	2,43	-7	0,53	0,515	-3
0,17	1,52	0,517	6,76	2,96	3,45	+16	1,13	1,14	+1
0,458	1,78	1,634	6,83	2,34	3,49	+49	2,05	2,64	+29

Такое упрощение приводит к существенным погрешностям особенно для двигателей малой мощности, а также для двигателей с повышенным скольжением (табл. 6-2). Следует отметить, что (6-4) также не обеспечивает достаточного соответствия расчетов фактическим данным современных асинхронных двигателей, так как вследствие сильного влияния вытеснения тока (двигатели с $h > 100$ мм) и насыщения путей потоков рассеяния их нельзя считать двигателями с постоянными параметрами. Кроме того, (6-4) не учитывает наличия минимального момента, обусловленного действием высших гармонических поля. На основании изучения экспериментальных механических характеристик большого количества двигателей серии 4А можно прийти к следующим выводам:

1) экспериментальные значения кратности максимального, минимального и начального пускового моментов близки к значениям, установленным в стандартах современных асинхронных двигателей. Так, анализ результатов испытаний 48 типоразмеров 2, 4, 6 и 8-полюсных двигателей серии 4А с $h = 160 \div 250$ мм показал, что фактические данные больше значений, указанных в ГОСТ 19523-74, почти на 10%, что представляет минимально необходимый резерв на производственные отклонения, поэтому формула механической характеристики современных асинхронных двигателей должна основываться на значениях моментов, установленных в стандарте;

2) точную формулу механической характеристики $M_* = f(s)$, основанную на анализе схемы замещения с переменными параметрами, получить чрезвычайно трудно, а пользование ею будет крайне неудобным, поэтому лучше всего вывести такую формулу на основании опытных данных;

3) по виду механических характеристик двигатели могут быть условно разделены на двигатели с жесткими характеристиками, у которых $s_{кр} \leq 0,15$, и с мягкими характеристиками, у которых $s_{кр} > 0,15$;

4) механическую характеристику следует разбить на две зоны: от $s = 1$ до $s = s_{кр}$ и от $s = s_{кр}$ до $s = s_{ном}$. В первой зоне для всех современных короткозамкнутых двигателей с роторами, залитыми алюминием, за исключением двигателей с двойной клеткой ротора, принима-

ется квадратичная зависимость момента от скольжения

$$M_* = a_0 + a_1 s + a_2 s^2, \quad (6-10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= (\xi_1 + \xi_2)/(1 - s_{кр}) > 0; \\ a_1 &= -2a_2(a_2 - \xi_2) < 0; \\ a_0 &= M_{п*} - (a_1 + a_2^2) > 0; \end{aligned} \right\} \quad (6-11)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= \sqrt{M_{кр*} - M_{п*}}; \\ \xi_2 &= \sqrt{M_{п*} - M_{min*}} \end{aligned} \right\} \quad (6-12)$$

здесь M_{min*} — кратность минимального момента.

Скольжение при минимальном моменте равно:

$$s_{min} = (a_2 - \xi_2)/a_2. \quad (6-13)$$

Замена действительной механической характеристики в диапазоне изменения скольжения от $s = 1$ до $s = s_{кр}$ зависимостью (6-10) производится по точкам максимального момента ($M_{кр*}$, $s_{кр}$), начального пускового момента ($M_{п*}$, $s = 1$) и минимального момента (M_{min*} , s_{min}) и определяется из условия $dM_*/ds = 0$.

Для двигателей с двойной клеткой ротора механическая характеристика в диапазоне скольжений от $s = 1$ до $s = s_{кр}$ заменяется прямой, проходящей через точку начального пускового момента ($M_{п*}$, $s = 1$) и точку максимального момента ($M_{кр*}$, $s_{кр}$)

$$M = a_0 + a_1 s, \quad (6-14)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{M_{кр*} - M_{п*} s_{кр}}{1 - s_{кр}} > 0; \\ a_1 &= \frac{M_{п*} - M_{кр*}}{1 - s_{кр}} < 0. \end{aligned} \right\} \quad (6-15)$$

Во второй зоне ($s = s_{кр}$, $s = 0$) для двигателей с жесткими характеристиками, в том числе и для двигателей с двойной клеткой ротора, принимается линейная зависимость:

$$M_* = M_{кр*} \frac{s}{s_{кр}} = a_1 s, \quad (6-16)$$

Для двигателей с мягкими характеристиками — квадратичная зависимость:

$$M_* = M_{кр*} - (M_{кр*} - 1) \left(\frac{s_{кр} - s}{s_{кр} - s_{ном}} \right)^2; \quad (6-17)$$

которая может быть приведена к виду (6-10) при

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= M_{кр*} - \frac{(M_{кр*} - 1) s_{кр}^2}{(s_{кр} - s_{ном})^2}; \\ a_1 &= 2 \frac{M_{кр*} - 1}{(s_{кр} - s_{ном})^2} s_{кр}; \\ a_2 &= \frac{M_{кр*} - 1}{(s_{кр} - s_{ном})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6-18)$$

Как видно из рис. 6-1 — 6-3, предложенные зависимости наиболее близки к фактическим соотношениям и с достаточной для практики точностью могут быть приняты для дальнейшего рассмотрения вопросов

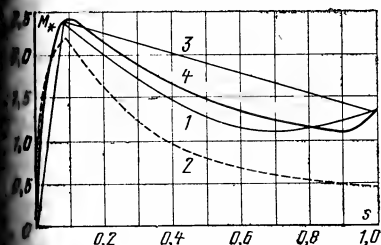


Рис. 6-1. Механическая характеристика двигателя 4АН180М4 (37 кВт, 1500 об/мин).

1 — по (6-10), (6-16); 2 — по (6-4); 3 — по (6-14), (6-16); 4 — по опыту.

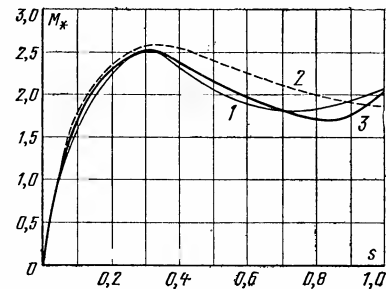


Рис. 6-2. Механическая характеристика двигателя 4А80В4 (1,5 кВт, 1500 об/мин).

1 — по (6-10), (6-17); 2 — по (6-4); 3 — по опыту.

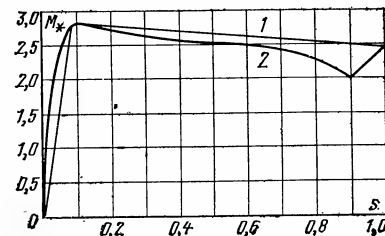


Рис. 6-3. Механическая характеристика двигателя 4АР180М4 (30 кВт, 1500 об/мин).

1 — по (6-14), (6-16); 2 — по опыту.

пуска асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт с роторами, залитыми алюминием.

6-3. ДИНАМИЧЕСКИЙ И СТАТИЧЕСКИЙ МОМЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Динамический момент сопротивления системы $M_{дин}$ равен:

$$M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Учитывая, что $\omega = \omega_c (1-s)$; $d\omega = -\omega_c ds$, и выражая динамический момент в долях номинального, получаем:

$$M_{дин*} = \frac{M_{дин}}{M_{ном}} = \frac{J \frac{d\omega}{dt}}{M_{ном}} = -\frac{J\omega_c}{M_{ном}} \frac{ds}{dt} = -T_M \frac{ds}{dt}, \quad (6-19)$$

где $J = GD^2/4g$ — момент инерции системы относительно оси вала двигателя; $T_M = \frac{J\omega_c}{M_{ном}} = \frac{GD^2 n_c}{375 M_{ном}}$ — электро-механическая постоянная времени.

Заметим, что

$$\omega_c M_{дин} s dt = \omega_c J \frac{d\omega}{dt} \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} dt = (\omega_c - \omega) J d\omega.$$

Тогда

$$T_M M_{ном} = J\omega_c;$$

$$\begin{aligned} \omega_c M_{ст} s dt &= \omega_c M_{ном} M_{ст*} s \left(-\frac{T_M}{M_* - M_{ст*}} \right) ds = \\ &= -\omega_c^2 J \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds. \end{aligned}$$

Из (6-19) с учетом (6-2) получим:

$$dt = -\frac{T_M}{M_{дин*}} ds = -\frac{T_M}{M_* - M_{ст*}} ds. \quad (6-20)$$

Статический момент сопротивления приводов может быть выражен обобщенной формулой:

$$M_{ст*} = \frac{M_{ст}}{M_{ном}} = b_0 + b_1 s + b_2 s^2, \quad (6-21)$$

в которой коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 могут принимать любые значения, включая нуль.

Для ряда приводов

$$M_{ст*} = \frac{M_{п*}}{d - cs}, \quad (6-22)$$

где d и c — постоянные.

При $s=1$ $M_{ст*} = M_{п*}/(d-c)$. Следовательно, $1/(d-c)$ — это коэффициент резерва, необходимого для обеспечения разгона двигателя в начале пуска. Этот коэффициент может быть принят равным 1,1.

6-4. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ ПУСКЕ

а) Длительность пуска

Длительность пуска $t_{п}$ может быть определена из (6-20)

$$t_{п} = T_M \int_{s_{ном}}^1 \frac{ds}{M_* - M_{ст*}} = t_{п1} + t_{п2}, \quad (6-23)$$

где $t_{п1}$ — длительность пуска в первой зоне (от $s=1$ до $s_{кр}$),

$$t_{п1} = T_M \int_{s_{кр}}^1 \frac{ds}{M_* - M_{ст*}}; \quad (6-24)$$

$t_{п2}$ — длительность пуска во второй зоне (от $s_{кр}$ до $s_{ном}$),

$$t_{п2} = T_M \int_{s_{ном}}^{s_{кр}} \frac{ds}{M_* - M_{ст*}}. \quad (6-25)$$

Исходя из полученных выражений (6-10), (6-14), (6-16), (6-17) для вращающих моментов и обобщенного момента сопротивления (6-21), можно определить разность $M_* - M_{ст*}$:

$$M_* - M_{ст*} = A_0 + A_1 s + A_2 s^2, \quad (6-26)$$

где

$$A_0 = a_0 - b_0; \quad A_1 = a_1 - b_1; \quad A_2 = a_2^2 - b_2. \quad (6-27)$$

Вычислим определенный интеграл, входящий в (6-24), с подстановкой значения подынтегральной функции (6-26):

$$\int_{s_{кр}}^1 \frac{ds}{M_* - M_{ст*}} = \int_{s_{кр}}^1 \frac{ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} =$$

$$= \begin{cases} \left[\frac{2}{\sqrt{-\delta}} \operatorname{arctg} \frac{2A_2 s + A_1}{\sqrt{-\delta}} \right]_{s_{кр}}^1 & \text{при } \delta < 0; \\ \left[-\frac{2}{A_1 + 2A_2 s} \right]_{s_{кр}}^1 & \text{при } \delta = 0; \\ \left[\frac{1}{\sqrt{\delta}} \ln \left(\frac{2A_2 s + A_1 + \sqrt{\delta}}{2A_2 s + A_1 - \sqrt{\delta}} \right) \right]_{s_{кр}}^1 & \text{при } \delta > 0, \end{cases} \quad (6-28)$$

где $\delta = A_1^2 - 4A_0A_2$.

Частные случаи:

при $A_0 = 0$

$$\int_{s_{кр}}^1 \frac{ds}{A_1 s + A_2 s^2} = \left[-\frac{1}{A_1} \ln \left| \frac{A_1 + A_2 s}{A_2 s} \right| \right]_{s_{кр}}^1; \quad (6-29)$$

при $A_1 = 0$

$$\int_{s_{кр}}^1 \frac{ds}{A_0 + A_2 s^2} = \left[\frac{1}{\sqrt{A_0 A_2}} \operatorname{arctg} s \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} \right]_{s_{кр}}^1; \quad (6-30)$$

при $A_2 = 0$

$$\int_{s_{кр}}^1 \frac{ds}{A_0 + A_1 s} = \left[\frac{1}{A_1} \ln (A_0 + A_1 s) \right]_{s_{кр}}^1, \quad (6-31)$$

Интеграл, входящий в (6-25), вычисляется аналогично.

При изменении $M_{с*}$ по (6-22) определенные интегралы, входящие в (6-24) и (6-25), вычисляются численными методами,

Потери энергии в обмотке ротора при пуске

Потери энергии в обмотке ротора при пуске за время dt равны:

$$W_{M2} = P_{M2} dt = P_{эм} s dt = \omega_c M_{дин} s dt + \omega_c M_{ст} s dt =$$

$$= J \left[(\omega_c - \omega) d\omega - \omega_c^2 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds \right] =$$

$$= -J \omega_c^2 \left(1 + \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} \right) ds. \quad (6-32)$$

Потери энергии в обмотке ротора за весь период пуска:

$$W_{M2} = \int_0^{t_{п}} P_{M2} dt = J \omega_c^2 \left[\int_{s_{НОМ}}^1 s ds + \int_{s_{НОМ}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds \right] =$$

$$= 0,5 J \omega_c^2 \left[1 - s_{НОМ}^2 + 2 \int_{s_{НОМ}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds \right] =$$

$$= 0,5 J \omega_c^2 [1 - s_{НОМ}^2 + 2k_p]; \quad (6-33)$$

$$k_p = \int_{s_{Н}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds = \int_{s_{кр}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds +$$

$$+ \int_{s_{НОМ}}^{s_{кр}} \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds. \quad (6-34)$$

При изменении $M_{ст*}$ по (6-21) и $M_* - M_{ст*}$ по (6-26) вычислим определенные интегралы в (6-34):

$$\int_{s_{кр}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} s ds = \int_{s_{кр}}^1 \frac{b_0 s + b_1 s^2 + b_2 s^3}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds =$$

$$= \int_{s_{кр}}^1 \frac{b_0 s}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds + \int_{s_{кр}}^1 \frac{b_1 s^2}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds +$$

$$+ \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_2 s^3}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds; \quad (6-35)$$

$$\int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_0 s}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds = \left[\frac{b_0}{2A_2} \ln(A_0 + A_1 s + A_2 s^2) \right]_{s_{\text{кр}}}^1 - \frac{A_1 b_0}{2A_2} \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2}; \quad (6-36)$$

$$\int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_1 s^2 ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} = \left[\frac{sb_1}{A_2} - \frac{A_1 b_1}{2A_2^2} \ln(A_0 + A_1 s + A_2 s^2) \right]_{s_{\text{кр}}}^1 + \frac{b_1 (A_1^2 - 2A_2 A_0)}{2A_2^2} \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2}; \quad (6-37)$$

$$\int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_2 s^3}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds = \frac{b_2 s^2}{2A_2} \Big|_{s_{\text{кр}}}^1 - \frac{A_0 b_2}{A_2} \times \times \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{s ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} - \frac{b_2 A_1}{A_2} \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{s^2 ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2}. \quad (6-38)$$

Интеграл $\int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{ds}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2}$ вычисляется по

(6-28). Интегралы, входящие в (6-38), находятся по (6-36) и (6-37).

Рассмотрим частные случаи: при равенстве нулю коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 принимаются равными нулю интегралы (6-36) — (6-38):

$$\begin{aligned} A_0 = 0; \\ \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_0 s + b_1 s^2 + b_2 s^3}{A_1 s + A_2 s^2} ds = \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2}{A_1 + A_2 s} ds = \\ = \left\{ \frac{b_0}{A_2} \ln |A_1 + A_2 s| + \frac{b_1}{A_2^2} [A_1 + A_2 s \ln |A_1 + \right. \\ \left. + A_2 s|] + \frac{b_2}{A_2^3} \left[\frac{(A_1 + A_2 s)^2}{2} - 2A_1 (A_1 + A_2 s) + \right. \right. \\ \left. \left. + A_1^2 \ln |A_1 + A_2 s| \right] \right\}_{s_{\text{кр}}}^1. \end{aligned} \quad (6-39)$$

$$\begin{aligned} A_1 = 0; \\ \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_0 s + b_1 s^2 + b_2 s^3}{A_0 + A_2 s^2} ds = \left[\frac{b}{\sqrt{A_0 A_2}} \operatorname{arctg} s \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} + \right. \\ \left. + \frac{b_1 s}{A_2} - \frac{b_1}{A_2} \sqrt{\frac{A_0}{A_2}} \operatorname{arctg} s \sqrt{\frac{A_2}{A_0}} + \frac{b_2}{2A_2} - \right. \\ \left. - \frac{A_0}{2A_2} \ln \left| \frac{A_0}{A_2} + s^2 \right| \right]_{s_{\text{кр}}}^1; \\ A_2 = 0; \end{aligned} \quad (6-40)$$

$$\begin{aligned} \int_{s_{\text{кр}}}^1 \frac{b_0 s + b_1 s^2 + b_2 s^3}{A_0 + A_1 s} ds = \left\{ \frac{b_0}{A_1^2} [A_0 + A_1 s - A_0 \ln |A_0 + \right. \\ \left. + A_1 s|] + \frac{b_2}{A_1^3} \left[\frac{A_0 + A_1 s}{2} - 2A_0 (A_0 + A_1 s) + \right. \right. \\ \left. \left. + A_0^2 \ln |A_0 + A_1 s| \right] + \frac{b_2}{A_1^4} \left[\frac{(A_0 + A_1 s)^3}{3} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{3A_0 (A_0 + A_1 s)^2}{2} + 3A_0^2 (A_1 + A_0 s) - A_0^3 \ln |A_1 + \right. \right. \\ \left. \left. + A_0 s| \right] \right\}_{s_{\text{кр}}}^1. \end{aligned} \quad (6-41)$$

Интеграл $\int_{s_{\text{ном}}}^{s_{\text{кр}}} \frac{M_{\text{ст}*}}{M_* - M_{\text{ст}*}} s ds$, входящий в (6-34),

находится аналогично.

При изменении $M_{ст*}$ по (6-22) интегралы в (6-34) вычисляются численными методами.

в) Потери энергии в обмотке статора при пуске

Потери в обмотке статора при пуске

$$W_{м1} = \int_0^{t_{\Pi}} 3I_1^2 r_1 dt = \int_0^{t_{\Pi}} \frac{I_1^2}{I_2'^2} \frac{r_1}{r_2'} \cdot 3I_2'^2 r_2' dt.$$

Принимая приближенно, что за период пуска $I_1/I_2' = 1/k = \text{const}$, $r_1 = r_2' = \text{const}$, получаем:

$$W_{м1} = \frac{1}{k^2} \frac{r_1}{r_2'} \int_0^{t_{\Pi}} 3I_2'^2 r_2' dt = \frac{1}{k^2} \frac{r_1}{r_2'} W_{м2}. \quad (6-42)$$

Полагая приближенно, что за период пуска в среднем $k \approx 0,9$, получаем:

$$W_{м1} \approx 1,24 \frac{r_1}{r_2'} W_{м2}. \quad (6-43)$$

В двигателях с глубоким пазом ротора в (6-43) входит сопротивление обмотки $r_{2\Xi}'$ с учетом вытеснения тока в стержнях. Среднее значение $r_{2\Xi}'$ за весь период пуска для роторов, залитых алюминием, может быть приближенно определено по формуле

$$r_{2\Xi}' \approx (0,42h_2 r_c + r_R) \frac{4m_1 \omega_1^2}{z_2} \left(\frac{k_{об1}}{k_{ск}} \right)^2. \quad (6-44)$$

где r_c — сопротивление стержня без учета вытеснения тока [см. (5-56)]; r_R — сопротивление короткозамыкающих колец [см. (5-57)]; h_2 — высота стержня (паза).

Потерями энергии в стали сердечников и механическими потерями можно пренебречь и считать, что суммарные потери энергии в самом двигателе за период пуска

$$\Sigma W \approx W_{м1} + W_{м2} = W_{м2} \left(1 + 1,24 \frac{r_1}{r_2'} \right). \quad (6-45)$$

Энергия, потребляемая двигателем период пуска

Энергия, потребляемая за период пуска, состоит из потерь энергии в обмотке статора $W_{м1}$, определяемых по (6-43), и энергии, передаваемой ротору вращающимся полем, $W_{эм}$.

Известно, что

$$P_{эм} = \omega_c M = \omega_c M_{дин} + \omega_c M_{ст} = \omega_c J \frac{d\omega}{dt} + \omega_c M_{ном} M_{ст*},$$

тогда

$$W_{эм} = \int_0^{t_{\Pi}} P_{эм} dt = \omega_c^2 J \int_{s_{ном}}^1 s ds + \frac{\omega_c^2}{T_M} J \int_0^{t_{\Pi}} M_{ст} dt =$$

$$\omega_c^2 J \left(1 - s_H + \int_{s_{ном}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} ds \right) = \omega_c^2 J (1 - s_{ном} + k_{\Pi}); \quad (6-46)$$

$$k_{\Pi} = \int_{s_{ном}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} ds = \int_{s_{кр}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} ds + \int_{s_{ном}}^{s_{кр}} \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} ds; \quad (6-47)$$

$$\int_{s_{кр}}^1 \frac{M_{ст*}}{M_* - M_{ст*}} ds = \int_{s_{кр}}^1 \frac{b_0}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds + \int_{s_{кр}}^1 \frac{b_1 s}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds + \int_{s_{кр}}^1 \frac{b_2 s^2}{A_0 + A_1 s + A_2 s^2} ds. \quad (6-48)$$

Вычисление интегралов в (6-48) сводится к вычислению интегралов (6-28), (6-36) и (6-37) соответственно.

РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ
И ДОБАВОЧНЫХ МОМЕНТОВ7-1. ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ПОЛЯ
В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ

Магнитное поле в воздушном зазоре асинхронной машины несинусоидальное. Высшие гармоники поля появляются вследствие расположения обмоток в пазах, неравномерности воздушного зазора, обусловленной наличием раскрытий пазов статора и ротора, несинусоидальности питающего напряжения и др. Даже в идеально изготовленной машине, питаемой от симметричного синусоидального напряжения, имеют место гармоники первых трех групп. Наиболее сильные — гармоники, обусловленные дискретным расположением обмотки в пазах, и гармоники, вызванные наличием открытых пазов статора и ротора.

Синусоидальный ток, протекающий по диаметральной катушке, создает пульсирующее прямоугольное магнитное поле (рис. 7-1). Пренебрегая магнитным напряжением стали ($\mu = \infty$) и считая воздушный зазор равномерным, определяем амплитуду индукции в воздушном зазоре:

$$B = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{V_2}{2} I_K \omega_K, \quad (7-1)$$

где I_K — действующее значение тока катушки; ω_K — число витков катушки.

Прямоугольное магнитное поле (рис. 7-1) можно разложить в ряд Фурье:

$$\begin{aligned} b &= \frac{4}{\pi} B \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t - \frac{4}{\pi \cdot 3} B \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t + \\ &+ \frac{4}{\pi \cdot 5} B \cos 5 \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t - \dots \\ b &= \frac{4}{\pi} B \cos \omega t \sum_{v=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{v} \cos v \frac{\pi}{\tau} x. \end{aligned} \quad (7-2)$$

Таким образом, прямоугольное пульсирующее поле диаметральной катушки можно представить как гармонический ряд пульсирующих полей, содержащий все не-

четные гармоники v . Каждое пульсирующее поле можно разложить на два вращающихся в противоположные стороны поля с половинной амплитудой:

$$b_k = \frac{2}{\pi} B \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \left[\cos \left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) + \cos \left(\omega t + v \frac{\pi}{\tau} x \right) \right]. \quad (7-3)$$

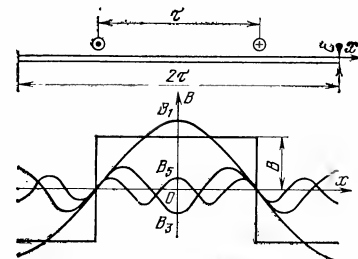


рис. 7-1. Магнитное поле диаметральной катушки.

Рассмотрим обмотку, состоящую из трех диаметральных катушек, сдвинутых в пространстве на угол $2/3\pi$, и питаемую трехфазным симметричным синусоидальным током. Катушки второй и третьей фаз создадут поля b'_k и b''_k :

$$\begin{aligned} b'_k &= \frac{2}{\pi} B \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \left\{ \cos \left[\left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) - v \pi \left(\frac{x}{\tau} - \frac{2}{3} \right) \right] + \right. \\ &+ \left. \cos \left[\left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + v \pi \left(\frac{x}{\tau} - \frac{2}{3} \right) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (7-4)$$

$$\begin{aligned} b''_k &= \frac{2}{\pi} B \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \left\{ \cos \left[\left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) - v \pi \left(\frac{x}{\tau} - \frac{4}{3} \right) \right] + \right. \\ &+ \left. \cos \left[\left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) + v \pi \left(\frac{x}{\tau} - \frac{4}{3} \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7-5)$$

Производя сложение (7-3) — (7-5), получаем отличное от нуля значение сумм только тех гармоник v , угол сдвига которых в пространстве отличается от угла сдвига во времени на $2k\pi$:

$$v = 6k + 1, \quad (7-6)$$

где k — любое целое положительное или отрицательное число.

Если k — число положительное, то v -я гармоника вращается согласно с основной, а если k — число отрицательное — встречно с ней.

Гармоники одинакового порядка v суммируются арифметически:

$$b_v = B_v \cos\left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x\right) = 3 \frac{2}{\pi v} B \cos\left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (7-7)$$

В общем случае для машин с целым q , с числом пар полюсов p , с полужакрытыми, полуоткрытыми или открытыми пазами амплитуда v -й гармоники поля статора с учетом магнитного напряжения стали равна:

$$B_v = \frac{3 \sqrt{2} \mu_0}{\pi \delta k_\delta k_\mu} \frac{1}{pv} \omega_1 k_{\text{об}v} k_{sv} I_1; \quad (7-8)$$

здесь k_δ — коэффициент воздушного зазора при двусторонней зубчатости (5-42); k_μ — коэффициент насыщения магнитной цепи (5-52); ω_1 — число последовательных витков обмотки фазы; $k_{\text{об}v}$ — обмоточный коэффициент для v -й гармоники; k_{sv} — обмоточный коэффициент открытия паза, учитывающий линейное распределение м. д. с. катушки по ширине открытия паза:

$$k_{sv} = \frac{\sin v \frac{p\pi}{z_1} \frac{b_{s1}}{t_1}}{v \frac{p\pi}{z_1} \frac{b_{s1}}{t_1}}. \quad (7-9)$$

В (7-8), (7-9) значение v подставляется с учетом знака. Особое значение имеют зубцовые гармоники v , порядок которых равен:

$$v_{z1} = \frac{z_1}{p} k_1 + 1, \quad (7-10)$$

где k_1 — любое целое положительное или отрицательное число.

Для зубцовых гармоник обмоточные коэффициенты равны обмоточному коэффициенту 1-й гармоники и существенно превышают обмоточные коэффициенты минус 5-й и плюс 7-й гармоник (при $q=2 \div 4$ и однослойных обмотках в 3,75—4,68 раза; при двухслойных обмотках с укороченным шагом это значение еще больше). Ам-

плитуды зубцовых гармоник обычно больше амплитуды незубцовых гармоник низкого порядка.

Так как добавочные потери пропорциональны квадрату индукции, то основную часть потерь создают зубцовые гармоники.

Все статорные гармоники поля создаются током частоты сети, поэтому частота вращения их в пространстве обратно пропорциональна порядку гармоники v :

$$n_v = n_1/v; \quad (7-11)$$

здесь n_1 — частота вращения основной гармоники. Частота вращения v -й гармоники поля статора относительно ротора

$$n'_v = \frac{n_1}{v} [1 - v(1 - s)], \quad (7-12)$$

где s — скольжение, а частота токов, наводимых в роторе,

$$f_{2v} = [1 - v(1 - s)] f_1. \quad (7-13)$$

При $v=1$

$$f_2 = s f_1. \quad (7-13a)$$

Амплитуда μ -й гармоники поля, создаваемого током ротора основной частоты (7-13 а), определяется по формуле, аналогичной (7-8):

$$B_\mu = \frac{\sqrt{2} \mu_0}{2\pi \delta k_\delta k_\mu} \frac{1}{p\mu} z_2 k_{\text{об}\mu} k_{s\mu} I_2, \quad (7-14)$$

где $k_{s\mu}$ — коэффициент открытия паза для гармоники μ ;

$$k_{\text{об}\mu} = \cos k_2 \pi. \quad (7-15)$$

Порядок этой гармоники поля ротора

$$\mu = \frac{z_2}{p} k_2 + 1. \quad (7-16)$$

В (7-15) и (7-16) k_2 — любое целое положительное или отрицательное число. Гармоники, определенные по (7-16), могут иметь дробный порядок. Это объясняется тем, что за период при разложении в ряд принято полное деление. При разложении в ряд на всей окружности машины дробные порядки исчезают ($\mu' = z_2 k_2 + p$).

Частота вращения гармоник поля μ -го порядка (7-16) относительно ротора

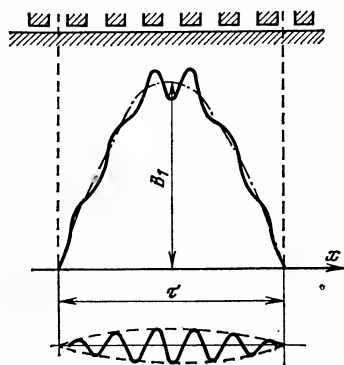
$$n'_\mu = \frac{n_1}{\mu} s, \quad (7-17)$$

а относительно статора

$$n_\mu = \frac{n_1}{\mu} [1 + (\mu - 1)(1 - s)]. \quad (7-18)$$

Частота токов, наводимых в статоре,

$$f_\mu = [1 + (\mu - 1)(1 - s)] f_1. \quad (7-19)$$



Другой вид гармоник создается в результате воздействия открытий пазов статора на поле основной гармоники (рис. 7-2). Полученные пульсации можно разложить на два вращающихся в противоположные стороны поля с половинной

Рис. 7-2. Возникновение гармоник, вызванных зубчатостью статора.

амплитудой. Порядки этих гармоник поля

$$\left. \begin{aligned} \nu_U &= \frac{z_1}{p} k_1 + 1; \\ \mu_U &= \frac{z_2}{p} k_2 + 1, \end{aligned} \right\} \quad (7-20)$$

а значения их амплитуд при $|k_1|, |k_2| = \pm 1$:

$$\left. \begin{aligned} B_{\nu U} &= \frac{\beta_1 B_1}{2} \cos \pi (1 + y_1 - q_1); \\ B_{\mu U} &= \frac{\beta_1 B_1}{2} \cos \pi, \end{aligned} \right\} \quad (7-21)$$

где B_1 — амплитуда основной гармоники поля; β_1 — по рис. 7-3; при $|k_1|, |k_2| > 1$ значение β может быть определено по [15, 53]; $\cos \pi (1 + y_1 - q_1)$ учитывает различное положение начала координат при определении гар-

моник (7-3) (ось фазы) и коэффициента β (середина пазов).

Гармоники (7-10) и (7-20), а также гармоники (7-16) и (7-20) имеют соответственно одинаковый порядок, одинаковую частоту вращения и складываются геометрически.

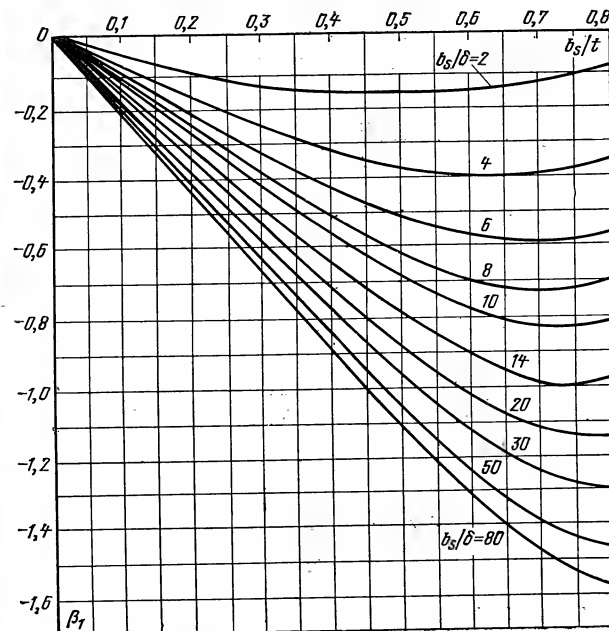


Рис. 7-3. Зависимость $\beta_1 = f(b_s/t)$.

Амплитуды результирующих гармоник:

$$B'_\nu = \sqrt{B_\nu^2 + B_{\nu U}^2 + 2B_\nu B_{\nu U} \sin \varphi}; \quad (7-22)$$

$$B'_\mu = \sqrt{B_\mu^2 + B_{\mu U}^2 + 2B_\mu B_{\mu U} \sin \psi}, \quad (7-23)$$

где φ — угол сдвига между векторами напряжения и тока статора; ψ — угол сдвига между векторами э. д. с. и тока ротора.

7-2. ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ПОЛЯ В ЗУБЦАХ РОТОРА И СТАТОРА

Вращающуюся гармонику поля статора (ротора) можно разложить на зубцовом делении ротора (статора) на два пульсирующих неподвижных относительно ротора (статора) поля: синус-компоненту и косинус-компоненту. В последней составляющей выделим среднее на зубцовом делении значение косинус-компоненты B_v ср:

$$b_v = B_v \cos \left(\omega_{2v} t - v \frac{\pi}{\tau} x_2 \right) = B_v \sin v \frac{\pi}{\tau} x_2 \sin \omega_{2v} t + \\ + \left(B_v \cos v \frac{\pi}{\tau} x_2 - B_{\text{ср}} \right) \cos \omega_{2v} t + B_{\text{ср}} \cos \omega_{2v} t; \quad (7-24)$$

здесь x_2 — координата по окружности ротора от середины зубца; ω_{2v} — угловая частота v -й гармоники поля статора относительно ротора;

$$b_{\text{ср}} = \frac{2}{t_2} \int_0^{t_2/2} B_v \cos v \frac{\pi}{\tau} x_2 dx_2 = k_v B_v; \quad (7-25)$$

$$k_v = \frac{\sin v \frac{\pi}{\tau} \frac{t_2}{2}}{v \frac{\pi}{\tau} \frac{t_2}{2}}, \quad (7-26)$$

где t_2 — зубцовое деление ротора.

Все три составляющие поля показаны на рис. 7-4. Потoki первых двух составляющих в (7-24) замыкаются через поверхность зубцов ротора и не сцеплены с его обмоткой. Они создают потери на поверхности зубцов (поверхностные потери) и на поверхности алюминия в шлицах полузакрытых пазов (поверхностные потери в обмотке). Постоянная составляющая косинус-компоненты (7-25) проникает в тело зубцов ротора и сцеплена с его обмоткой. Она создает потери в обмотке ротора, потери в зубцах ротора (пульсационные потери), потери в спинке ротора (пульсационные потери в спинке ротора) и потери на поверхности алюминия.

Поток, проникающий в зубцы ротора, равен:

$$\Phi_{vz} = B_v k_v t_2 l_2 k_{c2}. \quad (7-27)$$

Этот поток создает в контуре вокруг зубца (два верхняя и два участка короткозамыкающих колец) д. с.

$$E_{vk} = \frac{\omega_{2v}}{\sqrt{2}} \Phi_{vz}. \quad (7-28)$$

Под действием этой э. д. с. в контуре возникают токи, которые в машинах без скоса пазов (или со скосом

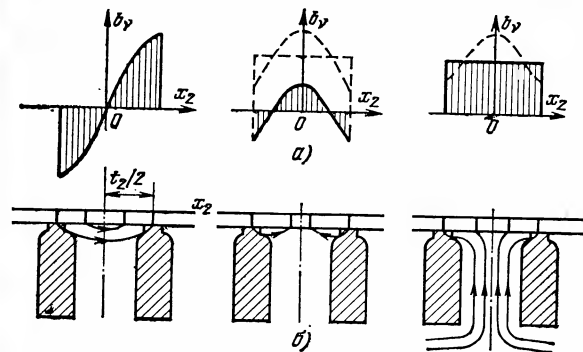


Рис. 7-4. Составляющие гармоники поля на зубцовом делении.

а — синус-компонента, переменная часть косинус-компоненты, среднее значение косинус-компоненты; б — поток в зубцовой зоне машины.

и заливкой ротора под давлением) практически полностью демпфируют потоки, проникающие в зубец. В зубцах статора демпфирования потока не происходит.

Можно также рассмотреть потоки высших гармоник поля в спинке ротора и статора, однако ввиду малости этих потоков ими обычно пренебрегают.

7-3. ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

Высшие гармоники поля создают так называемые добавочные потери, добавочные моменты, а также деформации статора и вала ротора, которые вызывают магнитные шумы и вибрации.

Каждая гармоника статора (ротора) наводит в роторе (статоре) токи высокой частоты (7-13), создавая в роторе (статоре) потери в стали сердечника и обмот-

ке ротора. Добавочные потери в современных асинхронных двигателях на напряжение до 1000 В составляют при номинальной нагрузке около 2% потребляемой мощности, а с учетом добавочных потерь холостого хода (входящих в потери в стали при обычных испытаниях) — около 3% потребляемой мощности. Таким образом, фактический к. п. д. в асинхронных двигателях

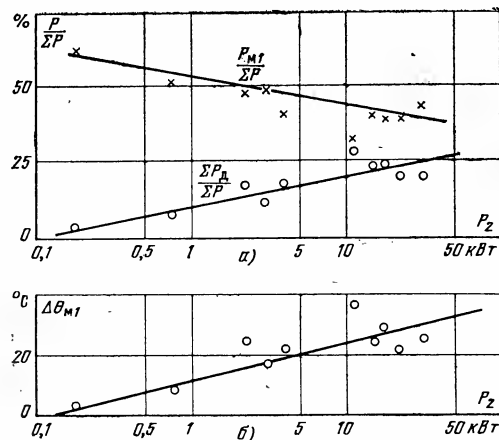


Рис. 7-5. Доля полных добавочных потерь в общей сумме потерь (а) и влияние добавочных потерь на превышение температуры обмотки статора (б).

общего назначения примерно на 1,5% ниже условного к. п. д., рассчитанного при добавочных потерях, равных $0,005 P_1$ в соответствии с ГОСТ 11828-75.

На рис. 7-5, а представлена зависимость доли полных добавочных потерь в сумме потерь $\Sigma P_d / \Sigma P = f(P_2)$ при номинальной нагрузке четырехполюсных двигателей серии 4А в исполнении по степени защиты IP44. Для сравнения приведена зависимость доли потерь в обмотке статора $P_{m1} / \Sigma P = f(P_2)$.

Из зависимости $\Delta \theta_{m1} = f(P_2)$ на рис. 7-5, б видно, что в машинах мощностью более 5 кВт добавочные потери обуславливают увеличение превышения температуры обмотки статора более чем на 20°C.

Кроме уменьшения к. п. д. и увеличения превышения температуры активных частей машины, а следовательно, и ее габаритов, добавочные потери вместе с добавочны-

ми моментами существенно снижают момент на валу двигателя во всем диапазоне от максимального до начального пускового и вызывают появление минимального момента.

Вопросы магнитных шумов и вибраций изложены в гл. 12.

7-4. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ

Добавочные потери в асинхронном двигателе создаются как при холостом ходе, так и при нагрузке. Так как добавочные потери холостого хода учтены при расчете потерь в стали (5-70), (5-73), рассмотрим расчет добавочных потерь при нагрузке. Высшие гармоники, создающие эти потери, приближенно можно определить по (7-8), (7-22), (7-23). При расчете амплитуд высших гармоник поля статора в (7-8) следует подставлять ток $I'_{ном}$, равный

$$I'_{ном} = \sqrt{I_{ном}^2 - I_{\mu}^2}; \quad (7-29)$$

здесь $I_{ном}$ — номинальный ток статора; I_{μ} — намагничивающий ток.

Формула (7-29) учитывает, что добавочные потери, соответствующие режиму холостого хода двигателя, при обычных испытаниях учитываются в потерях в стали.

Рассмотрим сначала асинхронный двигатель без ско-са пазов. Гармоника поля статора с амплитудой B_v наводит в контуре из двух стержней и двух участков колец в. д. с. по (7-28). Если пренебречь активным сопротивлением контура, а также его индуктивным сопротивлением, соответствующим потокам пазового и лобового рассеяний, то ток в контуре

$$I_{vk} = E_{vk} / x_{vk}, \quad (7-30)$$

где x_{vk} — сопротивление, соответствующее потоку взаимной индукции контура,

$$x_{vk} = \omega_{2v} \mu_0 \frac{t_2 l_2}{\delta k_{\delta} k_{\mu}}. \quad (7-31)$$

Добавочные потери в обмотке ротора

$$P_{доп, м2v} = 4z_2 I_{vk}^2 r_{vk} \sin^2 \frac{\delta_v}{2}, \quad (7-32)$$

где r_{vk} — сопротивление контура с учетом вытеснения тока в стержнях от v -й гармоники;

$$\delta_v = p v \frac{2\pi}{z_2} \quad (7-33)$$

Пульсационные потери в зубцах ротора практически отсутствуют.

Пульсационные потери в зубцах статора $P_{1\text{пул}\mu}$ от μ -й гармоники поля ротора

$$P_{1\text{пул}\mu} = p_{0,2/1000} \left(\frac{B_{\mu\text{ср}}}{0,2} k_{\mu} \frac{t_i}{b_{z1}} \frac{1}{k_{c1}} \right)^2 \left(\frac{f_{1\mu}}{1000} \right)^{1,5} \quad (7-34)$$

где b_{z1} — ширина расчетного сечения зубца статора.

Поверхностные потери в зубцах ротора $P_{2\text{пов}\mu}$ от v -й гармоники поля статора и поверхностные потери в зубцах статора $P_{1\text{пов}\mu}$ от μ -й гармоники поля ротора соответственно равны:

$$P_{2\text{пов}v} = 3,14 \cdot 10^3 k_{\text{обр}} p_{0,2/1000} \left(\frac{B_v}{0,2} \right)^2 \left(\frac{f_{2v}}{1000} \right)^{1,5} S_2 \frac{\tau}{|v|}; \quad (7-35)$$

$$P_{1\text{пов}\mu} = 3,14 \cdot 10^3 k_{\text{обр}} p_{0,2/1000} \left(\frac{B_{\mu}}{0,2} \right)^2 \left(\frac{f_{1\mu}}{1000} \right)^{1,5} S_1 \frac{\tau}{|\mu|}; \quad (7-36)$$

здесь $p_{0,2/1000}$ — удельные потери в стали при 0,2 Тл и 1000 Гц (для сталей 1211—1213 $p_{0,2/1000}=9,3$ Вт/кг, для стали 2013 $p_{0,2/1000}=11,3$ Вт/кг; S_2 — поверхность зубцов ротора,

$$S_2 = \pi D_{a2} l_2 \left(\frac{t_2 - b_{s2}}{t_2} \right);$$

S_1 — поверхность зубцов статора,

$$S_1 = \pi D_{i1} l_1 \left(\frac{t_1 - b_{s1}}{t_1} \right);$$

$k_{\text{обр}}$ — коэффициент обработки.

Коэффициент $k_{\text{обр}}$ равен 1 при отсутствии обработки, при хонинговании и при обработке ротационным резанием, а также для ротора со специальной изоляцией (например, образующейся при нагреве в случае центробежной заливки). Для ротора с закрытыми пазами при шлифовке он равен 1,2, а при проточке — 1,75, для ротора с полужакрытыми пазами при проточке и заливке под давлением — 2,8.

Поверхностные потери в алюминии шлицев ротора от v -й гармоники поля статора:

$$P_{\text{см}2v} = \left(\frac{B_v}{0,2} \frac{t_2 - k_{s2} b_{z2}}{b_{s2}} \right)^2 \left(\frac{f_{2v}}{1000} \right)^{1,5} \frac{\tau}{S_{\text{м}2} |v|} b_{s2} \cdot 10^9, \quad (7-37)$$

где $S_{\text{м}2}$ — поверхность открытий пазов ротора,

$$S_{\text{м}2} = z_2 b_{s2} l_2.$$

Кроме указанных выше потерь следует еще учесть добавочные потери основной частоты. Эти потери при номинальном режиме равны $0,0015P_2$ для сталей 1211—1213 и $0,003P_2$ для стали 2013.

При расчете добавочных потерь можно ограничиться рассмотрением незубцовых гармоник статора, порядок которых меньше порядка первых зубцовых гармоник, а также зубцовых гармоник статора (7-10) и гармоник ротора (7-16) первых пяти порядков ($k_1, k_2 = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 5$).

Ориентировочный расчет может быть проведен только для зубцовых гармоник статора и гармоник ротора первого порядка ($k_1, k_2 = \pm 1$). В этом случае учет других гармоник осуществляется увеличением потерь в об-

Таблица 7-1

Вид потери	Формула	v_{z1}, μ	$B_{v,\mu}, \text{Тл}$	$f_{v,\mu}, \text{Гц}$	Потери, Вт	Потери от всех гармоник, Вт
$P_{2\text{ пов } v}$	(7-35)	-17 19	0,0975 0,0859	866 861	8,2 6,6	37
$P_{1\text{ пов } \mu}$	(7-36)	-12 14	0,125 0,1055	574 674	4,4 3,6	20
$P_{1\text{ пул } \mu}$	(7-34)	-12 14	0,125 0,1055	574 674	9,4 2,5	21
$P_{\text{д}, \text{м}^2 v}$	(7-32)	-17 19	0,0976 0,0859	866 861	3,5 5,6	19
$P_{\text{с}, \text{м}^2 v}$	(7-37)	-17 19	0,0976 0,0856	866 861	14,8 9,4	36
$P_{\text{д}1}$	—	1	—	—	—	15
$\Sigma P_{\text{д}}$						148

мотке ротора (7-32) в 2 раза, пульсационных потерь (7-34) — в 1,75 раза, поверхностных потерь (7-35), (7-36) — в 2,5 раза, поверхностных потерь в шлицах ротора (7-37) — в 1,5 раза.

Пример ориентировочного расчета добавочных потерь четырехполюсного двигателя мощностью 10 кВт с соотношением чисел пазов $z_1/z_2 = 36/26$ приведен в табл. 7-1.

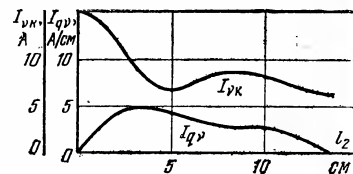
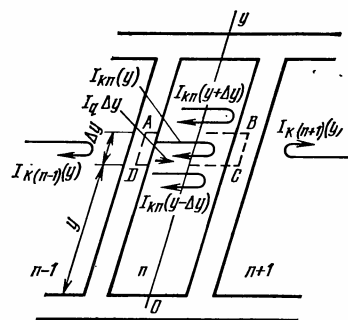


Рис. 7-7. Распределение по длине ротора контурного тока I_{κ} и поперечного тока I_{qv} от 23-й (зубцовой) гармоники.

Рис. 7-6. Схема токов в элементарном контуре ротора.

В случае машин со скосом пазов картина потоков существенно усложняется. Рассмотрим произвольный контур $n(y)$ (рис. 7-6). Очевидно, что в любом контуре наводятся одинаковые по значению, но сдвинутые по фазе э. д. с., под действием которых возникает система контурных токов [57]. «Ручной» расчет этих токов представляет значительные трудности. На рис. 7-7 показаны результаты расчета на ЭВМ контурного I_{κ} и поперечного тока I_{qv} (равного геометрической разности соседних по длине стержня контурных токов). Как видно, эти токи различны в различных участках ротора. Зная эти токи, можно определить потери в клетке ротора $P_{д,м2}$ и потери в изоляции клетки ротора $P_{м2q}$ (от поперечных токов). Подробный анализ показывает, что зависимость потерь $P_{м2q}$ (а также всех добавочных потерь) имеет максимум при некотором значении сопротивления изоляции клетки ротора z_q (рис. 7-8). Существование максимума можно объяснить следующими физическими соображениями. При малых сопротивлениях изоляции величина z_q практически не влияет на величину поперечных токов, и потери от этих токов приблизительно могут быть выражены линейной зависимостью: $P_{м2q} = k r_q$. При

больших значениях z_q потери обратно пропорциональны сопротивлению изоляции клетки ротора ($P_{м2q} = k'/r_q$). Диапазон сопротивлений клетки ротора показан на рис. 7-9. Незаштрихованные прямоугольники на рис. 7-9 соответствуют данным [66].

Как видно из рис. 7-9, машины с роторами, залитыми под давлением, имеют сопротивление изоляции клетки ротора, близкое к экстремальному (зона 7 на рис. 7-9).

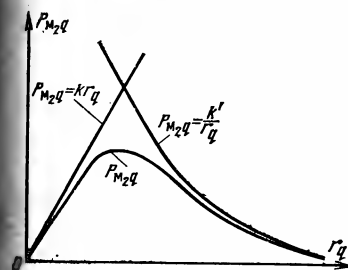


Рис. 7-8.

Рис. 7-8. Зависимость $P_{м2q} = f(r_q)$.

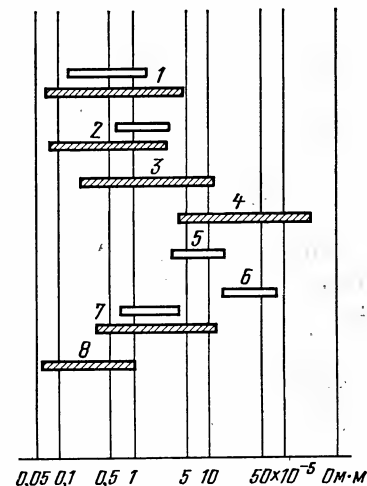


Рис. 7-9.

Рис. 7-9. Влияние метода заливки на сопротивление изоляции клетки ротора.

1 — заливка под давлением, пазы полузакрытые; 2 — заливка под давлением, пазы закрытые; 3 — заливка центробежная или вибрационная, пазы полузакрытые; 4 — заливка центробежная или вибрационная, пазы закрытые; 5 — сварная клетка, плотная посадка; 6 — сварная клетка; 7 — зона максимума добавочных потерь; 8 — зона максимума добавочных моментов.

Для приближенных расчетов добавочных потерь в машине со скосом пазов можно рассчитать потери без

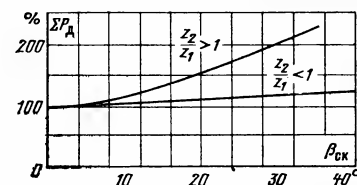


Рис. 7-10. Зависимость $\Sigma P_{д} = f(\beta_{ск})$.

скоса пазов, а затем учесть увеличение потерь по кривым на рис. 7-10, полученным в результате испытаний многих машин общего назначения с роторами, залитыми под давлением. Для машин с другими видами заливки ориентировочно можно принять, что потери не зависят от скоса пазов при $z_2/z_1 < 1$ и увеличиваются по нижней кривой на рис. 7-10 при $z_2/z_1 > 1$.

Методика расчета добавочных потерь может быть использована для ориентировочных расчетов и выбора наилучшего по добавочным потерям варианта конструкции и технологии двигателя.

7-5. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ МОМЕНТОВ

Высшие гармоники создают добавочные моменты различных видов. Каждая высшая гармоника поля статора наводит в роторе ток, в результате взаимодействия кото-

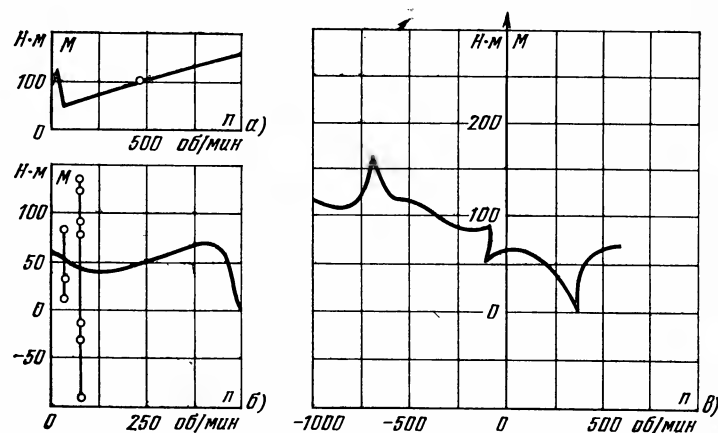


Рис. 7-11. Виды добавочных моментов в асинхронной машине.

a — асинхронный, $2p=4$; $z_1=36$; $z_2=46$; $b_{CK}/I_1=0$; b — синхронный, $2p=6$; $z_1=36$; $z_2=36+6$; $b_{CK}/I_1=0$; $в$ — вибрационный, $2p=4$, $z_1=36$; $z_2=36-4-1$; $b_{CK}/I_1=1$.

рого с потоком возникает асинхронный момент (рис. 7-11, a). По кривой момента можно легко определить порядок гармоники статора, которая вызвала этот момент. Для этого нужно найти синхронную частоту вращения гармоники статора n_v (средняя частота вращения ротора между частотами, соответствующими мак-

симуму и минимуму добавочного асинхронного момента). Далее находится порядок гармоники:

$$\nu = \frac{n_1}{n_v} = \frac{1500}{79} = 19. \quad (7-38)$$

В данном случае асинхронный момент создан 19-й (зубцовой) гармоникой.

Синхронный момент возникает в результате взаимодействия двух гармоник поля статора и ротора одного порядка при определенной частоте вращения ротора, когда эти поля неподвижны относительно друг друга. Этот момент аналогичен моменту синхронной машины и зависит от взаимного положения полей. Синхронный провал характерен тем, что при определенной скорости момент имеет существенно отличные значения (рис. 7-11, b). Наиболее существенные синхронные моменты возникают при взаимодействии зубцовых гармоник статора и ротора первого и второго порядка, т. е. в (7-10) и (7-16) $k_1, k_2 = \pm 1, \pm 2$.

Если $\mu = \nu$, то момент создается при неподвижном роторе, если $\mu = -\nu$, то синхронный момент создается при частоте вращения ротора, равной

$$n_c = -2pn_1/z_2 k_2. \quad (7-39)$$

Таким образом, порядок гармоники ротора μ можно определить по (7-39):

$$\mu = -2 \frac{n_1}{n_c} + 1 = -2 \frac{1000}{143} + 1 \approx -13. \quad (7-40)$$

Гармоника статора имеет порядок $\nu = +13$, т. е. в данном случае сильнейший синхронный момент возникает в результате взаимодействия зубцовых гармоник статора и ротора первого порядка. Вибрационные моменты создаются в результате взаимодействия гармоник статора и ротора, число пар полюсов которых отличается на единицу:

$$|p\nu| - |p\mu| = \pm 1. \quad (7-41)$$

В этом случае возникает биеение ротора. При приближении частоты биеения к частоте собственных колебаний ротора наблюдается односторонний провал момента (рис. 7-11, $в$), который сопровождается значительным шумом. В тормозном режиме при этом возникает всплеск момента. Наиболее сильные зубцовые провалы возникают при взаимодействии зубцовых гармоник ротора и

статора первого порядка. Зная число пазов статора и ротора, можно определить гармоники, которые вызвали вибрационный провал. В случае, представленном на рис. 7-11, в:

$$p\mu = -31 + 2 = -29; \quad p\mu = +31 + 2 = 33;$$

$$pv = -36 + 2 = -34; \quad pv = +36 + 2 = 38.$$

Вибрационный провал возник в результате взаимодействия 33/2-й гармоники ротора с минус 17-й гармоникой статора.

Для устранения сильных синхронных и вибрационных провалов, созданных зубцовыми гармониками статора и ротора, следует при выборе соотношений чисел пазов ротора и статора руководствоваться рекомендациями, приведенными в § 2-5.

Асинхронные моменты, Н·м, могут быть ориентировочно рассчитаны по [39]

$$M_{\text{вк}} = \frac{3}{2} \frac{U_i}{I_{\mu}} \frac{v}{2\pi f} \frac{I_{\text{лп}}^2}{1 + \tau_{2dv}} \left(p \frac{k_{\text{овв}}}{k_{\text{овл}}} \right)^2, \quad (7-42)$$

где $I_{\text{лп}}$ — начальный пусковой ток; τ_{2dv} — коэффициент дифференциального рассеяния для v -й гармоники,

$$1 + \tau_{2dv} = \frac{\left(v \frac{\pi p}{z_2} \right)^2}{\sin^2 v \frac{\pi p}{z_2}}. \quad (7-43)$$

7-6. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПОЛЯ

К этим способам относятся: специальные виды обмоток статора, выбор шага обмотки, увеличение числа пазов статора, увеличение воздушного зазора, применение дополнительного охлаждения ротора, выбор оптимального открытия паза статора, применение магнитных клиньев и магнитной замазки. Обычно эти методы снижают все вредные воздействия высших гармоник: добавочные потери, добавочные моменты и магнитные шумы.

Специальные виды обмоток

Известно большое количество различных схем обмоток, подавляющих высшие гармоники, особенно незуб-

овых порядков: синусная, с полуобмотками, соединенными в звезду и треугольник, с перемешанными фазами [39]. Однако ввиду усложнения производства и небольшого эффекта в асинхронных двигателях на напряжение 1000 В с относительно небольшим значением q эти обмотки не применяются.

Выбор шага обмотки

Для двухслойных шестизонных обмоток наилучшим является шаг около 5/6, который эффективно подавляет 5-ю и 7-ю гармоники. Переход на укороченный шаг обмотки в двигателях мощностью 1—20 кВт обычно снижает добавочные потери примерно на 1/5, повышает условный к. п. д. в среднем на 0,75% и снижает температуру обмотки статора в среднем на 5°C. Этот метод широко применяется в двигателях с $h \geq 160$ мм. Двигатели с меньшей высотой вращения обычно выполняются с однослойной обмоткой, и снижение добавочных потерь в них достигается увеличением числа пазов статора или изменением числа пазов ротора [58]. В ряде машин с двухслойной обмоткой целесообразно выбирать шаг, исходя из условия подавления незубцовых гармоник, создающих сильный синхронный момент. Такие синхронные моменты возникают в двигательном режиме при

$$z_2 = |6k + 2|p. \quad (7-44)$$

Примеры соотношений чисел пазов, при которых в процессе пуска двигателя появляются существенные синхронные моменты, обусловленные взаимодействием незубцовых гармоник статора v с гармониками ротора μ , приведены в табл. 7-2.

В первой двухполюсной машине при шаге 9/12 получается наименьший обмоточный коэффициент для 19-й

Таблица 7-2

$2p$	z_1	z_2	μ	v
2	24	$(6 \cdot 3 + 2) \cdot 1 = 20$	-19	+19
2	36	$(6 \cdot 4 + 2) \cdot 1 = 26$	-25	+25
4	36	$(6 \cdot 2 + 2) \cdot 2 = 28$	-13	+13
4	46	$(6 \cdot 3 + 2) \cdot 2 = 40$	-19	+19
6	54	$(6 \cdot 2 + 2) \cdot 3 = 42$	-13	+13
8	72	$(6 \cdot 2 + 2) \cdot 4 = 56$	-13	+13

гармоники, что приводит к существенному подавлению синхронного момента.

В машинах с трехзонными обмотками следует выбирать диаметральный шаг. В противном случае кроме нечетных гармоник (7-6) возникают дополнительные четные гармоники, которые вызывают увеличение добавочных потерь и возникновение дополнительных добавочных моментов. Так, в восьмиполусном двигателе с $z_2/z_1=44/48$ при переходе с диаметрального шага на укороченный возник синхронный момент от взаимодействия 10-й роторной и 10-й статорной гармоник, при этом минимальный момент упал до нуля.

Увеличение числа пазов статора

При увеличении числа пазов статора наиболее существенные зубцовые гармоники уменьшаются приблизительно обратно пропорционально числу зубцов статора. Расчеты и эксперименты показывают, что примерно так же изменяются и добавочные потери. В ряде случаев переход на большее число пазов статора (и ротора) позволяет отказаться от скоса пазов и получить дополнительное снижение добавочных потерь.

Этот метод снижения добавочных потерь применен, в частности, в серии 4А.

Увеличение воздушного зазора

При увеличении воздушного зазора амплитуда высших гармоник поля изменяется приблизительно обратно пропорционально воздушному зазору, а добавочные потери — обратно пропорциональны квадрату (несколько меньше) воздушного зазора. Однако при увеличении воздушного зазора ухудшается коэффициент мощности, особенно в многополусных машинах. Практическое применение этот метод нашел главным образом на двухполусных машинах.

Дополнительное охлаждение ротора

В асинхронных двигателях общего назначения со степенью защиты IP 44 вследствие большего нагрева ротора, чем статора, воздушный зазор уменьшается на 7—12,5% [60], т.е. добавочные потери возрастают на 15—27%. Применение дополнительного охлаждения ротора позволяет сохранить воздушный зазор в нагретом состоянии машины, т.е. снизить добавочные потери на

15—27%. Дополнительное (форсированное) охлаждение ротора применено в двигателях серии АОЗ с $h=315\div 355$ мм (двигатели с продуваемым ротором).

Выбор оптимального открытия пазов статора

Как указывалось в § 9-1, зубцовые гармоники статора представляют собой геометрическую сумму гармоник поля, обусловленной открытием пазов статора, и гармоники поля от м.д.с. (7-22). При увеличении открытия паза статора составляющая по (7-21) увеличивается, а составляющая по (7-8) уменьшается. Следовательно, при некотором оптимальном открытии паза статора достигается минимальное значение амплитуды высшей зубцовой гармоники и минимум добавочных потерь.

Экспериментально показано, что оптимальное открытие паза статора двух—четырехполусных машин обычно больше применяемого на практике, а на шести—восьмиполусных машинах — меньше обычно применяемого, причем кривые имеют пологий характер.

Увеличение открытия паза повышает надежность машин, так как уменьшается вероятность повреждения изоляции при укладке обмотки в пазы, и увеличивает производительность труда при укладке.

Практическое применение этот метод нашел в двухполусных двигателях серии 4А.

Применение магнитных клиньев

Применение магнитных клиньев улучшает форму кривой поля, особенно при холостом ходе, и повышает к.п.д. двигателей, в ряде случаев до 1% [61]. Приближенно можно рассматривать применение клиньев как изменение эффективного раскрытия паза статора.

7-7. КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ И МОМЕНТОВ

К конструктивным методам снижения добавочных потерь и моментов относятся выбор соотношения числа пазов ротора и статора [16], применение закрытых пазов ротора, выбор скоса пазов, применение специальных конструкций ротора.

Выбор соотношения числа пазов ротора и статора

Коэффициенты (7-26) для первых зубцовых гармоник статора ($v_z \approx z_1/p$) и ротора ($\mu \approx z_2/p$) соответственно равны:

$$k_{vz} = \frac{\sin(z_1 \pi / z_2)}{z_1 \pi / z_2};$$

$$k_{\mu z} = \frac{\sin(z_2 \pi / z_1)}{z_2 \pi / z_1}.$$

Зависимости коэффициентов k_{vz} и $k_{\mu z}$, определяющих потоки, проникающие в зубцы ротора (т.е. потери в клетке и изоляции клетки ротора и пульсационные потери в роторе) и в зубцы статора (т.е. пульсационные потери в статоре), от отношения z_2/z_1 показаны на рис. 7-12. Как следует из рис. 7-12, добавочные потери минимальны при $z_2/z_1 = 1$.

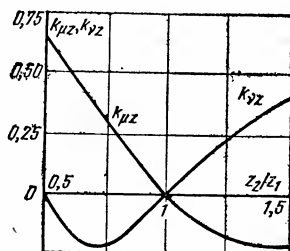


Рис. 7-12. Зависимости $k_{vz} = f(z_2/z_1)$, $k_{\mu z} = f(z_2/z_1)$ для зубцовых гармоник первого порядка.

Указанный характер изменения добавочных потерь от соотношения числа пазов ротора и статора подтвержден экспериментально [16]. Однако выполнение условия $z_2 \approx z_1$ невозможно, так как в результате взаимодействия первых зубцовых гармоник статора и ротора возникают значительные вибрационные моменты и синхронные моменты в начале пуска ($n=0$). Подробные исследования показали, что для асинхронных двигателей удовлетворительные показатели по всем характеристикам дают следующие соотношения:

$$\text{при } 2p \neq 2 \quad z_2 = z_1 - p; \quad (7-45)$$

$$\text{при } 2p = 2,4 \quad z_2 = z_1 - 2p. \quad (7-46)$$

В последнем случае всегда следует применять скос пазов на одно зубцовое деление. В первом случае необходимость скоса определяется уровнем магнитного шума.

Испытания, проведенные на ряде асинхронных двигателей с $h=71 \div 200$ мм, показали, что при переходе с традиционных соотношений ($z_2/z_1 > 1$ или $z_2/z_1 < 1$) на

соотношении пазов по (7-45) наблюдается снижение добавочных потерь, повышение условного к.п.д. на 0,5—1%, снижение превышения температуры обмотки статора и повышение минимального момента.

Применение закрытых пазов ротора

С точки зрения снижения добавочных потерь и магнитных шумов, а также с точки зрения технологичности конструкции предпочтительны закрытые пазы ротора. В частности, применение таких пазов устраняет потери в шлицах ротора, залитых алюминием, и снижает поверхностные потери в роторе (вследствие устранения размазывания алюминия по поверхности ротора). По экспериментальным данным переход на закрытые пазы снижает добавочные потери примерно на $1/3$ — $1/5$. Закрытые пазы ротора широко применяются в мировой практике, в частности в серии 4А в двигателях с высотой оси вращения 160—355 мм.

Выбор скоса пазов

Применение скоса пазов позволяет снизить магнитные шумы и вибрации, уменьшить синхронные и вибрационные моменты, а также асинхронные моменты высших гармоник (при $z_2/z_1 < 1$). Однако применение скоса пазов приводит к увеличению добавочных потерь (рис. 7-10), увеличению превышения температуры обмотки статора и снижению к.п.д., поэтому желательно выпускать машины без скоса пазов, если это возможно по виброшумовым и пусковым характеристикам. Очевидно, что с увеличением числа пазов на полюс и фазу увеличивается число возможных соотношений числа пазов ротора и статора и возрастает вероятность нахождения такого соотношения, которое обеспечивает удовлетворительные характеристики. Существует определенная граница, ниже которой двигатели должны выпускаться, как правило, со скосом пазов.

Применение специальных конструкций ротора

Известно большое число запатентованных конструкций роторов, например: ротор с многократным скосом, ступенчатый ротор, ротор с тройной клеткой и др. [59]. Однако ввиду существенного повышения трудоемкости эти конструкции в двигателях массового производства практически не применяются.

7-8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ И МОМЕНТОВ

К технологическим методам снижения добавочных потерь, вызванных высшими гармониками, относятся изолирование клетки ротора, выбор способа заливки, изоляция листов сердечников ротора и статора, выбор способа механической обработки сердечников ротора и статора, дополнительная обработка залитого ротора.

Изолированные клетки ротора

Известно большое число патентов на способы изолирования клетки ротора. Однако ввиду усложнения технологии в двигателях общего назначения они не применяются. В сериях ряда зарубежных фирм используются сварные медные или паяные алюминиевые клетки [62, 63], которые можно рассматривать как изолированные.

Выбор вида заливки ротора

Переход с заливки под давлением на другие виды заливки (центробежная, вибрационная, статическая) позволяет снизить добавочные потери и улучшить характеристики машин [64]. Так при $z_2/z_1 > 1$ такой переход приводит к снижению добавочных потерь приблизительно на $1/3$, повышению фактического к. п. д. на 1,2%, снижению превышения температуры обмотки статора в среднем на 13°C . В машинах без скоса пазов или с соотношением $z_2/z_1 < 1$ улучшение этих показателей соответственно составило 0,3% и $4,5^\circ\text{C}$. Однако заливка роторов под давлением наиболее производительна и по этой причине применяется повсеместно в двигателях мощностью до 100 кВт, например в серии 4А до высоты оси вращения 250 мм. Снижение добавочных потерь в таких машинах достигается другими методами (выбор соотношения $z_2/z_1 < 1$, применение закрытых пазов ротора и др.).

Изолирование листов ротора и статора

В современных сериях асинхронных двигателей применяются холоднокатаные стали, которые или имеют изоляционное покрытие, нанесенное на металлургических заводах, или оксидируются после штамповки. Для производства серии АО2 использовались горячекатаные

стали, в большинстве случаев не имеющие специальной изоляции, кроме оксидной пленки, образующейся в процессе прокатки стали.

Изолирование листов ротора в машинах с роторами, залитыми под давлением, без скоса пазов или при $z_2/z_1 < 1$ со скосом приводит к повышению условного к. п. д. приблизительно на 0,3%. В машинах с $z_2/z_1 > 1$ условный к. п. д. обычно не менялся, но возрастал минимальный момент (в некоторых случаях в 2 раза).

Выбор вида механической обработки пакета ротора и статора

Для получения равномерного воздушного зазора наружную поверхность ротора и иногда (в машинах с алюминиевыми корпусами) внутреннюю поверхность статора обрабатывают. При такой механической обработке возникают добавочные потери. Желательно отказаться от механической обработки статора и ротора вообще. Такая технология применяется фирмой Триге-Титан для малых двигателей и для больших двигателей фирмой АСЕА [63, 65]. Однако в большинстве случаев механическая обработка применяется. Ее наилучшим видом является обработка ротационным резанием. Практически она не дает повышения добавочных потерь или снижает добавочные потери по сравнению с обычной проточкой резцом.

Для обработки поверхности статора целесообразно применять хонингование, которое не увеличивает добавочные потери.

Дополнительная термическая обработка залитого ротора

Дополнительная термическая обработка ротора, залитого под давлением, приводит к снижению добавочных потерь, а также способствует существенному улучшению минимального момента. Такая термообработка широко применяется во многих странах мира. Шведская фирма АСЕА сочетает термическую обработку залитого ротора с последующей химической. В СССР термическая обработка залитого под давлением ротора применяется в серии 4А, причем она сочетается с горячей посадкой ротора на вал.

ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

8-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

И ЗАДАЧИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА

Работа, совершаемая нагнетательными элементами (вентилятором, лопатками ротора, т.п.), выражается в поддержании необходимой для обеспечения требуемого расхода воздуха разности давлений (напора) между входным и выходным сечениями вентиляционного тракта машины. Схемы вентиляции самовентилируемых машин подразделяются на нагнетательные и вытяжные. При нагнетательной схеме воздух сначала поступает в вентилятор, а затем — в вентиляционную сеть машины. В этом случае вентилятор создает избыточное давление воздуха в сети по сравнению с атмосферным. При вытяжной схеме вентиляции воздух вначале поступает в вентиляционную сеть машины, а затем — в вентилятор. В этом случае вентилятор создает разрежение в вентиляционной сети. По мере движения к выходному сечению полное давление воздуха в каналах уменьшается за счет необратимых потерь на преодоление аэродинамического сопротивления сети Z . Разность давлений между двумя сечениями канала, по которому движется воздух, называется потерями напора (давления) ΔH и вычисляется по закону Аткинсона

$$\Delta H = ZQ^2, \quad (8-1)$$

где Q — расход воздуха.

Если вентилятор присоединить к сети, а затем менять ее аэродинамическое сопротивление, то окажется, что каждому расходу воздуха соответствует вполне определенная величина развиваемого вентилятором напора H . Зависимость напора от расхода воздуха $H=f(Q)$ называется аэродинамической характеристикой вентилятора. Характер этой зависимости определяется конструкцией вентилятора. Для обеспечения заданного расхода воздуха Q_p рабочий напор вентилятора H_p должен быть равен сумме потерь напора в вентиляционной сети ΔH , т.е. $\Delta H = H_p$ или

$$ZQ_p^2 = f(Q_p).$$

Последнее равенство называют уравнением равновесия. Точное решение этого уравнения в аналитической форме часто затруднительно, так как характеристика вентилятора $H=f(Q)$, а иногда и характеристика сопротивления сети являются весьма сложными функциями расхода. В этом случае применяется простой графический метод решения уравнения равновесия — метод наложения (рис. 8-1). На общий график с координатами H и Q заносятся аэродинамическая характеристика вентилятора $H=f(Q)$ и характеристика сети $\Delta H=ZQ^2$.

Точка их пересечения определяет рабочий расход воздуха Q_p через сеть (производительность вентилятора).

Таким образом, для определения расхода воздуха необходимо знать аэродинамическую характеристику вентилятора и характеристику вентиляционной сети машины.

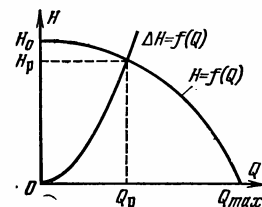


Рис. 8-1. Графический метод решения уравнения равновесия.

Однако знания общего расхода воздуха часто оказывается недостаточно для того, чтобы судить об интенсивности охлаждения частей машины, так как поступающий воздух распределяется по элементам сети в зависимости от их аэродинамического сопротивления.

В соответствии с изложенным вентиляционный расчет электрических машин должен решать разные задачи. В крупных электрических машинах, а также в машинах с принудительной вентиляцией основной задачей расчета является определение конструктивных параметров вентилятора, обеспечивающих необходимый расход воздуха, а также расчет распределения воздуха по отдельным элементам вентиляционной сети.

В асинхронных двигателях малой и средней мощности с самовентиляцией основные параметры вентилятора, определяющие его производительность: наружный диаметр лопаток и частоту вращения, однозначно определяются высотой оси вращения, допустимым уровнем шума и числом полюсов машины. Существенные ограничения на выбор конструкции вентилятора накладывают также условия массового производства и реверсивность двигателей (унификация вентиляторов двигателей разной полюсности, применение рабочих колес с ради-

альными лопатками). Предметом выбора могут быть лишь менее существенные параметры, например в двигателях со степенью защиты IP 44 диаметр кожуха и входного отверстия, число и профиль лопаток, диаметр диска рабочего колеса и т. п.

В силу этих ограничений задачи вентиляционного расчета сводятся преимущественно к определению расхода воздуха и скорости обдува элементов машины при заданных конструктивных параметрах вентилятора и вентиляционной сети, т. е. расчет носит проверочный характер. Он полезен на стадии проверки принятых конструктивных решений, до изготовления опытных образцов двигателей. Кроме того, сравнение результатов проверочного расчета с результатами измерений позволяет уточнить общие представления о влиянии отдельных факторов на результаты расчета. Особую ценность представляют упрощенные методы вентиляционного расчета с минимальным количеством входных параметров, которые можно использовать на стадии предварительной оценки возможностей данной системы охлаждения.

8-2. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

а) Режимы течения

Существуют два вида движения жидкости (газа): ламинарное (слоистое), при котором отдельные слои жидкости (газа) скользят друг относительно друга, не смешиваясь между собой, и турбулентное (неупорядоченное), когда частицы жидкости (газа) движутся по сложным, все время изменяющимся траекториям, в результате чего происходит интенсивное перемешивание слоев движущейся жидкости. Режим течения зависит от значения безразмерного комплекса, который называется числом Рейнольдса (Re) и характеризует отношение между силами инерции и силами трения в потоке жидкости (газа):

$$Re = wd/\nu,$$

где w — характерная скорость жидкости (газа); d — характерный линейный размер канала; ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости (газа).

Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного течения к турбулентному, называется критическим $Re_{кр}$. Для течения в гладких трубах круглого сечения $Re_{кр} = 2300$, если за характерный линейный размер d принят диаметр трубы. При $Re < Re_{кр}$ режим течения ламинарный, при $Re > Re_{кр}$ — турбулентный. Одновременно с изменением режима течения меняется характер распределения скоростей по сечению (рис. 8-2).

При ламинарном движении скорость в сечении трубы, достаточно удаленном от входа, распределяется по параболическому закону. При стабилизированном турбулентном течении происходит выравнивание скоростей по сечению канала: отношение средней скорости к максимальной колеблется в пределах 0,8—0,9 в зависимости от числа Рейнольдса. В непосредственной близости к стенкам канала сохраняется вязкий (ламинарный) подслой, в пределах которого скорость изменяется линейно. Толщина этого подслоя зависит от степени турбулентности потока и определяется по [67].

Степень турбулентности, %, характеризуется отношением средней квадратичной пульсации скорости v к средней скорости потока w :

$$\xi = \frac{v}{w} \cdot 100.$$

б) Потери напора и аэродинамические сопротивления

В вентиляционной сети условно различают два вида потерь напора: потери напора на трение и местные потери напора [69].

Потери напора на трение возникают в результате обмена количеством движения, который происходит между молекулами (при ламинарном течении) или отдельными частицами (при турбулентном течении) соседних слоев воздуха, движущихся с различными скоростями.

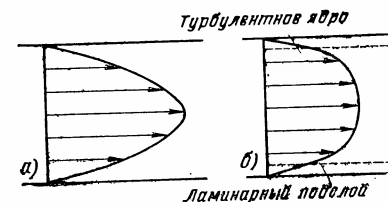


Рис. 8-2. Распределение скоростей по сечению трубы.

а — при ламинарном режиме течения;
б — при турбулентном режиме течения.

Потери напора на трение определяются по формуле

$$\Delta H_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d_v} \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{s} \right)^2 = \xi \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{s} \right)^2, \quad (8-2)$$

где λ — коэффициент трения; l — длина участка; d_v — гидравлический диаметр канала (учетверенное отношение площади поперечного сечения канала к его смоченному периметру); ρ — плотность воздуха; s — сечение канала; $\xi = \lambda \frac{l}{d_v}$ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Для канала круглого сечения $d_v = d$. Гидравлический диаметр канала прямоугольного сечения размером $a \times b$ рассчитывается по формуле

$$d_v = 2ab/(a + b).$$

При ламинарном течении коэффициент λ уменьшается с увеличением Re и может рассчитываться по формуле

$$\lambda = 64/Re.$$

Коэффициент трения λ в гидравлически гладких каналах при турбулентном течении определяется по формуле Блазиуса [68]:

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25},$$

а в гидравлически шероховатых каналах — по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,1 \left(\Delta/d_v \right)^{0,25},$$

Таблица 8-1

Вид поверхности	$\Delta, 10^{-4} \text{ м}$
Поверхность шихтованного сердечника	5
Листовая сталь	1
Поверхность чугунного литья:	
нешпаклеванная	15
шпаклеванная	5
Поверхность алюминиевого литья	1
Цельнотянутые трубы:	
новые	2
старые	10

где Δ — абсолютная шероховатость, ее значения указаны в табл. 8-1.

Каналы считаются гидравлически гладкими, если толщина ламинарного слоя больше высоты выступов шероховатости.

Коэффициент трения в каналах круглого и прямоугольного сечения при $Re \gg Re_{\text{кр}}$ может находиться так-

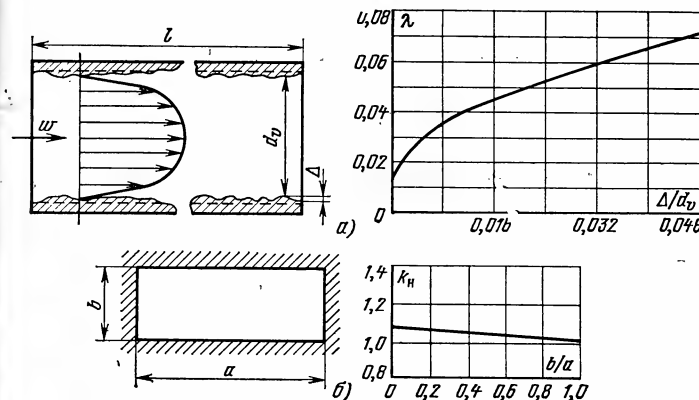


Рис. 8-3. Диаграмма для определения сопротивления трения.
а — канал круглого сечения; б — канал прямоугольного сечения.

же по диаграммам (рис. 8-3, а, б). При этом для канала прямоугольного сечения (рис. 8-3, б)

$$\lambda' = \lambda k_n,$$

где λ определяется по рис. 8-3, а; k_n — коэффициент формы канала, находится по рис. 8-3, б.

При ламинарном течении потери напора пропорциональны скорости воздуха в первой степени, при турбулентном — близки или пропорциональны квадрату скорости.

Местные потери напора обусловлены в основном расходом энергии на отрыв потока и образование вихрей в местах изменения сечения (скорости) и направления потока (рис. 8-4, а—в). Потери ΔH_m определяются по формуле Вейсбаха:

$$\Delta H_m = \xi \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{s} \right)^2, \quad (8-3)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления.

При решении уравнения равновесия методом наложения, а также при расчете сложных вентиляционных сетей выражать сопротивление сети через потери напора неудобно, так как потери зависят от расхода, который обычно неизвестен и является объектом расчета, поэтому в электромашиностроении пользуются предпочтительно аэродинамическими сопротивлениями, которые

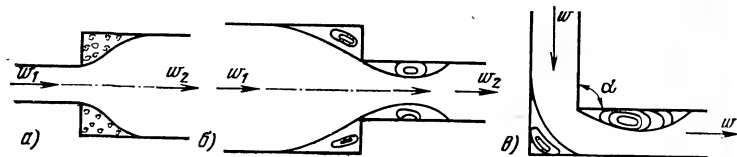


Рис. 8-4. Схемы образования вихревых зон в местных сопротивлениях.

а — внезапное расширение; б — внезапное сужение; в — поворот потока

более наглядно характеризуют качество вентиляционной системы независимо от количества проходящего через нее воздуха.

Если ввести обозначение

$$Z = \xi \frac{\rho}{2s^2}, \quad (8-4)$$

то (8-2) и (8-3) принимают вид формулы Аткинсона (8-1), в которой вентиляционная сеть характеризуется аэродинамическим сопротивлением Z . При развитом турбулентном течении ($Re \gg Re_{кр}$) сопротивление Z зависит только от геометрических параметров вентиляционной сети. Как видно из (8-4), оно обратно пропорционально квадрату сечения канала.

Коэффициенты местных сопротивлений определяют, как правило, эмпирически и приведены в [69]. Лишь для потерь при внезапном расширении (рис. 8-4, а) аналитически получена формула

$$\xi = (1 - s_1/s_2)^2,$$

где s_1 и s_2 — сечения узкого и широкого участков канала соответственно.

Для случая выхода воздуха в свободное пространство, когда $s_2 = \infty$, $\xi = 1$. Потери при изменении направления потока (рис. 8-4, в) зависят от угла поворота α .

при плавном повороте они могут быть в 4 раза меньше, чем при резком повороте.

Следует отметить, что в [69] коэффициенты трения местных сопротивлений относятся к длинным участкам каналов с установившимся профилем скоростей, тогда как в электрических машинах, особенно малой и средней мощности, отдельные виды сопротивлений находятся в непосредственной близости одно от другого и профиль скоростей на входе в отдельные элементы вентиляционной системы, как правило, неустановившийся. В связи с этим при расчете электрических машин значения соответствующих коэффициентов необходимо увеличивать на 10—30% [70].

в) Аэродинамические сопротивления, обусловленные вращением каналов или потоков воздуха

Кроме указанных выше сопротивлений, характерных для любой вентиляционной сети, в электрических машинах имеются специфические сопротивления, обусловленные вращением каналов, по которым протекает воздух, а также вращением потока воздуха на входе в канал.

Потери напора во вращающемся канале могут превышать потери в том же канале в неподвижном состоянии в десятки раз. Увеличение сопротивления канала при вращении происходит по нескольким причинам. Во-первых, при вращении канала возрастают местные сопротивления входу и выходу. Потери напора на входе во вращающийся канал пропорциональны квадрату абсолютной скорости, которая может быть в несколько раз больше относительной скорости.

Коэффициенты сопротивления входа и выхода для вращающегося аксиального канала можно определять по эмпирической зависимости [70]

$$\xi_w = \xi \left[1 + 0,03 \frac{u}{w} - 0,004 \left(\frac{u}{w} \right)^2 \right]^2,$$

где ξ — коэффициент сопротивления входа или выхода для неподвижного канала; u — переносная скорость (окружная скорость вращающегося канала); w — средняя касательная скорость в канале.

Во вращающемся канале проявляются силы Кориолиса, которые смещают поток в сторону, противоположную направлению вращения канала. Вследствие этого

движение воздуха относительно стенок приобретает винтовой характер, причем относительная скорость воздуха в этом движении может быть значительно больше расходной скорости.

Наконец, центробежные силы стабилизируют поток, благодаря чему увеличивается критическое число Рейнольдса (от значения $Re_{кр} = 2300$ у неподвижного канала до $Re_{кр} = 20\,000 \div 30\,000$ и более — у вращающегося). В результате наложения этих явлений коэффициент трения вращающегося канала возрастает пропорционально отношению окружной скорости к расходной (осевой) и зависит от числа Рейнольдса.

При ламинарном режиме в радиальных каналах коэффициент трения определяется по формуле [67]

$$\lambda = \frac{64}{Re} \left(10^2 \frac{R_0}{Re} + 0,1 R_0^{0,2} Re^{0,5} \right),$$

где R_0 — коэффициент вращения, $R_0 = \omega \frac{d_v}{\omega}$; ω — угловая частота вращения канала; d_v — гидравлический диаметр канала; ω — расходная составляющая скорости воздуха в канале.

При турбулентном режиме

$$\lambda = 0,3164 R_0^{0,1} Re^{-0,2}.$$

Критическое число Рейнольдса для течения во вращающихся каналах зависит от коэффициента вращения:

$$Re_{кр} = R_0 \cdot 10^5.$$

Числа Рейнольдса определяются по расходной составляющей скорости воздуха в канале ω , за определяющий размер принят гидравлический диаметр канала d_v .

Коэффициент трения λ для аксиальных вращающихся каналов определяется по формулам, приведенным в [70].

Специфический вид сопротивления, характерный для вращающихся электрических машин (так называемое центробежное сопротивление), возникает в тех случаях, когда поток, вращающийся в камере большого диаметра, выходит из нее через центральное отверстие меньшего диаметра или через решетку в торцевой стенке [71]. Вращение потока может быть обусловлено нагнетательными элементами (вентилятором, лопатками ро-

ра и т. д.) или входом потока в камеру по касательной к ее боковой поверхности (рис. 8-5). В этом случае поток, движущийся от периферии к отверстию, преодолевает действие центробежных сил, что вызывает снижение действующего начального напора вентилятора и значение ΔH_0 , которое зависит от положения отверстия относительно оси вращения.

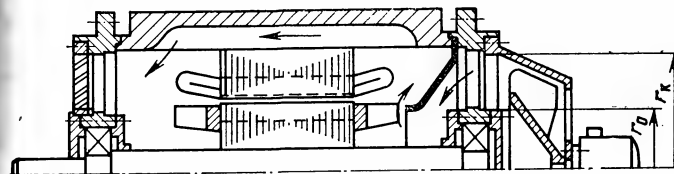


Рис. 8-5. Схема вентиляции лифтового двигателя.

Для центрального отверстия

$$\Delta H_0 = \rho \frac{\omega^2}{2} (r_k^2 - r_0^2),$$

где ω — угловая частота вращения потока; r_k и r_0 — радиусы камеры и центрального отверстия соответственно.

Кроме того, вращение потока приводит к уменьшению сечения центрального отверстия, используемого для выхода воздуха. Потери напора, обусловленные центробежными силами, могут быть соизмеримы с общими потерями напора в электрических машинах.

Исследования особенностей этого вида аэродинамического сопротивления, к сожалению, еще не доведены до стадии инженерных расчетов.

г) Расчет сложных вентиляционных сетей

Элементы вентиляционного тракта и соответственно отдельные виды сопротивлений могут соединяться между собой самым различным образом. Вентиляционную сеть электрической машины принято изображать в виде схемы замещения, содержащей сопротивления, соединенные между собой отрезками каналов, не имеющих сопротивлений.

В сетях с последовательным соединением n сопротивлений расход на всех участках сети неизменен и со-

противление сети Z определяется как сумма составляющих сопротивлений Z_i :

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i.$$

В сетях параллельным соединением n сопротивлений общее сопротивление сети определяется из условия

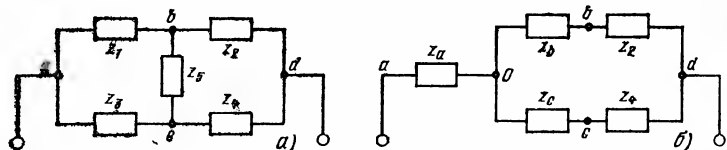


Рис. 8-6. Диагональная схема замещения (а) и ее преобразование (б).

постоянства перепада напора для всех параллельных ветвей:

$$Z = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{Z_i}}\right)^2}.$$

Расход воздуха в отдельных ветвях равен:

$$Q_i = Q \sqrt{Z/Z_i}.$$

Для схем, состоящих из двух параллельных ветвей,

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{(\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2})^2};$$

$$Q_1 = \frac{Q}{1 + \sqrt{Z_1/Z_2}}; \quad Q_2 = \frac{Q}{1 + \sqrt{Z_2/Z_1}}.$$

Схема замещения с параллельно-последовательным соединением аэродинамических сопротивлений и диагональной связью представлена на рис. 8-6.

Направление потока воздуха в диагонали b, c зависит от соотношения сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 .

Если

$$Z_1/Z_2 > Z_3/Z_4,$$

то воздух в диагонали движется от точки c к точке b .

Обратное направление движения имеет место при

$$Z_1/Z_2 < Z_3/Z_4.$$

В связи с нелинейностью закона Аткинсона (8-1) точное аналитическое решение сложных вентиляционных схем невозможно. Существует большое количество приемов расчета вентиляционных схем замещения графическими и графоаналитическими методами, а также методами последовательных приближений, которые составляют предмет теории вентиляционных сетей [79]. Эта теория основана на двух законах сетей, соответствующих двум законам Кирхгофа:

1) алгебраическая сумма расходов в узле схемы равна нулю:

$$\sum Q_i = 0;$$

2) алгебраическая сумма напоров и потерь напора в замкнутом контуре равна нулю:

$$\sum \Delta H_i + \sum H_i = 0.$$

В числе наиболее распространенных можно указать метод уравнивания потерь напора, метод преобразования треугольника в звезду [61].

Общее сопротивление диагональной схемы замещения (рис. 8-6) при использовании преобразования треугольника (Z_1, Z_3, Z_4) в эквивалентную звезду определяется по формуле:

$$Z = Z_a + \frac{(Z_b + Z_2)(Z_c + Z_4)}{(\sqrt{Z_b + Z_2} + \sqrt{Z_c + Z_4})^2},$$

где

$$Z_{ab} = Z_1(Z_5 + Z_3)/(\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_5 + Z_3})^2;$$

$$Z_{ca} = Z_5(Z_3 + Z_1)/(\sqrt{Z_5} + \sqrt{Z_3 + Z_1})^2;$$

$$Z_{bc} = Z_3(Z_5 + Z_3)/(\sqrt{Z_3} + \sqrt{Z_5 + Z_3})^2;$$

$$Z_a = (Z_{ab} + Z_{ca} - Z_{bc})/2; \quad Z_b = (Z_{ab} + Z_{bc} - Z_{ca})/2; \quad Z_c = (Z_{bc} + Z_{ca} - Z_{ab})/2.$$

При анализе экспериментальных данных и решении вентиляционных схем средней сложности весьма полезными являются графические методы. Они основаны на том, что при сложении графических характеристик последовательно соединенных элементов складываются их

ординаты, при сложении характеристик параллельно соединенных элементов складываются абсциссы.

Для расчета сложных вентиляционных схем могут применяться также цифровые и аналоговые ЭВМ. Особенно перспективными в вентиляционных расчетах электрических машин являются аналоговые ЭВМ. В основе аналоговой машины лежит набор нелинейных сопротивлений, выполненных из электронных ламп или полупроводниковых диодов и отградуированных в единицах аэродинамического сопротивления. Расчет сводится к сборке вентиляционной схемы замещения из таких элементов и измерению токов и напряжений на отдельных участках схемы. Распределение токов тождественно распределению расходов, распределение потерь напряжения — распределению потерь напора.

8.3. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Для воздушного охлаждения асинхронных двигателей применяются, как правило, центробежные вентиляторы с радиальными лопатками, так как они обеспечи-

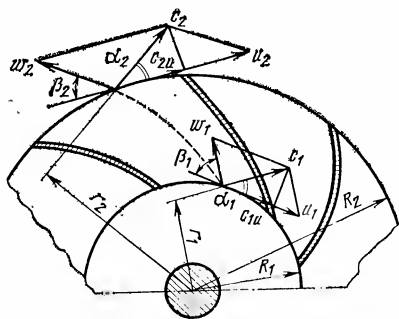


Рис. 8-7. Треугольники скоростей потока в рабочем колесе.

вают более высокий напор и постоянный расход воздуха при реверсировании двигателей. Передача энергии воздуху в таком вентиляторе происходит во время прохождения потока в радиальном направлении через вращающееся колесо, снабженное лопатками. Этот процесс сопровождается изменением давления, направления и скорости воздуха.

Рассмотрим вентилятор с загнутыми лопатками. Абсолютную скорость движения воздуха в межлопаточном канале рабочего колеса c (т. е. скорость относительно неподвижной системы отсчета) можно представить как геометрическую сумму двух составляющих (рис. 8-7):

1) переносной скорости (скорость колеса), направленной по касательной к окружности радиусом R , на которой находится рассматриваемая частица воздуха

$$u = \omega R,$$

где ω — угловая скорость;

2) относительной скорости w (скорость относительно межлопаточных каналов колеса), направленной по касательной к поверхности лопатки в данной точке.

Более 200 лет назад Л. Эйлер, применив теорему моментов количества движения к потоку в межлопаточном канале, показал, что напор (давление), развиваемый центробежным колесом, определяется значением и направлением этих скоростей и описывается уравнением

$$H_T = \rho (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}), \quad (8-5)$$

где H_T — теоретический напор; c_u — проекция абсолютной скорости на касательную к окружности (тангенциальная составляющая абсолютной скорости).

Индекс 1 указывает на параметры воздушного потока при входе в межлопаточный канал, индекс 2 — при выходе. Уравнение (8-5) называется турбинным уравнением Эйлера и является основным уравнением лопастных машин. Оно получено для бесконечного количества бесконечно тонких лопаток и равномерного поля скоростей воздуха при входе и выходе из колеса и при условии, что тангенциальная составляющая скорости на входе c_{1u} создана каким-либо внешним источником или устройством (например, направляющим аппаратом). В электрических машинах такие устройства, как правило, отсутствуют, поэтому $c_{1u} = 0$ и уравнение (8-5) принимает вид:

$$H_T = \rho u_2 c_{2u}. \quad (8-6)$$

Окружная скорость u_2 однозначно определяется наружным диаметром и частотой вращения колеса. Следовательно, влияние конструкции вентилятора на теоретический напор определяется тангенциальной составляющей абсолютной скорости на выходе из колеса c_{2u} . При радиальном расположении лопаток на выходе $c_{2u} = u_2$ и $H_T = \rho u_2^2$.

Уравнение (8-6) из геометрических соображений можно записать в виде

$$H_T = \rho u_2 (u_2 \pm w_2 \cos \beta_2).$$

Если лопатки на выходе загнуты назад, то угол между относительной скоростью и касательной к окружности $\beta_2 < 90^\circ$. Тогда

$$C_{2u} = u_2 - \omega_2 \cos \beta_2,$$

т. е. теоретический напор меньше, чем у колеса с радиальными лопатками. У колес с загнутыми вперед лопатками $\beta_2 > 90^\circ$ и $C_{2u} = u_2 + \omega_2 \cos \beta_2$. Такие колеса обладают максимальным теоретическим напором.

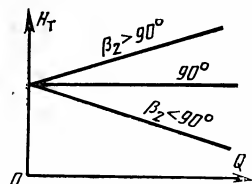


Рис. 8-8. Теоретические характеристики вентиляторов.

Относительная скорость ω_2 в первом приближении пропорциональна расходу воздуха Q . Из этого следует, что у вентилятора с радиальными лопатками аэродинамическая характеристика не зависит от расхода, при загнутых вперед лопатках характеристика монотонно возрастает, при загнутых назад лопатках с увеличением расхода

воздуха — монотонно убывает (рис. 8-8).

До сих пор везде речь шла о полном напоре, который выражает полную энергию единицы объема движущегося воздуха. Здесь необходимо это понятие конкретизировать. В соответствии с двумя видами механической энергии (потенциальная и кинетическая) полный напор является суммой динамического $H_{дин}$ и статического $H_{ст}$ напоров. Динамический напор выражает энергию, которую необходимо затратить, чтобы единице объема движущегося воздуха сообщить соответствующую скорость ω :

$$H_{дин} = \frac{\rho}{2} \omega^2.$$

Статический напор является мерой потенциальной энергии единицы объема. В идеальной несжимаемой движущейся жидкости полный напор есть величина постоянная (уравнение Бернулли):

$$H_{ц} = H_{дин} + H_{ст} = \text{const},$$

поэтому чем больше скорость потока, тем меньше статический напор $H_{ст}$, и наоборот.

Если теперь вернуться к характеристикам теоретического напора, то необходимо отметить, что рабочие ко-

леса с загнутыми вперед лопатками создают большой динамический напор, тогда как у колес с загнутыми назад лопатками преобладает статический напор.

У колес с радиальными лопатками полный теоретический напор H_T состоит из равных частей статического и динамического напоров. Для того, чтобы динамический напор вентилятора полезно использовать в вентиляционной сети, необходимо с помощью спрямляющих аппаратов или диффузоров преобразовать его в статический.

Реальный напор H , создаваемый вентилятором, всегда меньше теоретического на значение потерь в самом вентиляторе. Если из теоретического напора вычесть потери напора в вентиляторе при каждом значении расхода, то получим внешнюю аэродинамическую характеристику вентилятора.

Потери напора в вентиляторе можно разделить на три категории [61]:

1) потери, связанные с тем, что вход потока в колесо осуществляется не на оси вращения, как предполагает уравнение Эйлера, а на радиусе R_1 при окружной скорости $u_1 = \omega R_1$;

2) необратимые потери торможения струи после выхода из рабочего колеса;

3) потери напора в самом колесе.

Потери первой категории связаны с перемещением частицы газа из точки поля центробежных сил с нулевым потенциалом в точку с потенциалом $\frac{\rho}{2} u_1^2$:

$$\Delta H_{ц} = \frac{1}{2} \rho u_1^2.$$

Вторая категория потерь обусловлена тем, что динамическое давление после выхода потока из колеса не может быть полностью преобразовано в статическое, поэтому часть энергии, затраченная на создание этого давления, необратимо теряется. Как указывалось, динамическое давление зависит от угла наклона лопаток на выходе. Степень преобразования динамического давления в статическое зависит от наличия после колеса спрямляющего аппарата диффузора, учитывается коэффициентом восстановления статического давления на выходе k .

Необратимые потери торможения струи после выхода из рабочего колеса определяются выражением

$$\Delta H_{\text{дин}} = (1 - k) \left(\frac{\rho}{2} u_2^2 \pm \rho u_2 \omega_2 \cos \beta_2 \right).$$

Коэффициент восстановления колеблется в широком диапазоне в зависимости от конструкции машины. Так, при наличии после колеса спрямляющего аппарата $k=0,6$, при наличии диффузора $k=0,3$, если поток выходит из колеса в лобовую часть обмотки, $k=0,1$.

Потери напора в самом колесе (третья категория потерь) имеют сложную природу и связаны не только с методикой расчета, но и с проблемой выбора оптимальных конструктивных параметров рабочего колеса. Подробно эти потери рассматриваются в § 8-4,а. Здесь необходимо отметить, что некоторые потери, например потери в межлопаточных каналах, имеют минимум в режиме холостого хода ($Q=0$). Потери на трение диска остаются практически постоянными во всех режимах работы колеса. Потери на удар и вихреобразование имеют минимум при некотором оптимальном расходе. Несмотря на это, можно для удобства расчетов потери в самом вентиляторе формально определять так же, как и другие потери, — с использованием формулы $\Delta H = ZQ^2$. Вся сложность физических взаимодействий воздушного потока с рабочим колесом учитывается аэродинамическим сопротивлением Z , которое в данном случае зависит от расхода, т. е. $Z=f(Q)$. С учетом вышесказанного уравнение внешней аэродинамической характеристики центробежного вентилятора принимает вид:

$$H = H_T - \Delta H_{\text{ц}} - \Delta H_{\text{дин}} - ZQ^2 = \frac{1}{2} \rho u_2^2 + k \left(\frac{1}{2} \rho u_2^2 \pm \rho u_2 \omega_2 \cos \beta_2 \right) - \frac{1}{2} \rho u_1^2 - f(Q) Q^2.$$

Этому уравнению можно придать универсальную форму, разделив левую и правую части на ρu_2^2 и введя обозначения:

$$H_* = H / \rho u_2^2 \text{ — относительный напор;}$$

$$Q_* = Q / \pi D_2 b_2 u_2 = \omega_2 / u_2 \text{ — относительный расход;}$$

$$R_* = R_1 / R_2 = u_1 / u_2 \text{ — относительный радиус.}$$

Однако в любой записи сложный характер потерь в самом рабочем колесе не изменяется, что препятствует

применению строго аналитических методов расчета внешних аэродинамических характеристик вентиляторов. Это же время универсальными характеристиками удобно пользоваться при расчете характеристик вентиляторов по результатам моделирования геометрически подобных колес. В этом случае, помимо приведенных выводов относительного напора и относительного расхода, применяется еще относительная мощность

$$P_{\text{вен}*} = \frac{102 P_{\text{вен}}}{\pi D_2 \rho u_2^3 b}. \quad (8-7)$$

Иногда относительный расход и относительная мощность записываются в виде

$$Q_* = \frac{4Q}{\pi D_2^2 u_2}; \quad P_{\text{вен}*} = \frac{102 P_{\text{вен}}}{\rho u_2^3 (\pi D_2^2 / 4)}. \quad (8-8)$$

Результаты испытания модели представляются в виде безразмерных характеристик, по которым, пользуясь соотношениями (8-6) и (8-8), можно рассчитать режим работы или аэродинамическую характеристику геометрически подобного вентилятора.

При оценке влияния изменения частоты вращения (от n до n_1) или диаметра колеса (от D_2 до D_{21}) на аэродинамические характеристики вентилятора можно пользоваться формулами пропорциональности:

$$Q_1 = Q \frac{D_{21}^3}{D_2^3}; \quad Q_1 = Q \frac{n_1}{n}; \quad H_1 = H \frac{D_{21}^2}{D_2^2}; \quad H_1 = H \frac{n_1^2}{n^2};$$

$$P_{\text{вен}1} = P_{\text{вен}} \frac{D_{21}^5}{D_2^5}; \quad P_{\text{вен}1} = P_{\text{вен}} \frac{n_1^3}{n^3}.$$

Как видно, расход воздуха пропорционален наружному диаметру лопаток в кубе, напор — в квадрате, потребляемая мощность — в пятой степени.

8-4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВСТРОЕННЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Применяющиеся в настоящее время методы расчета встроенных вентиляторов электрических машин можно разделить на две группы:

1) расчет рабочих режимов вентиляторов на основе анализа кинематики потока в рабочем колесе (70);

2) расчет аэродинамических характеристик вентиляторов и сопротивления сети с последующим их графическим или аналитическим наложением [73, 75].

Первая группа методов аналогична методам расчета общепромышленных вентиляторов. Однако в электрических машинах с самовентиляцией вентилятор не является самостоятельным агрегатом, а представляет собой лишь отдельный узел электрической машины, что оказывает решающее влияние на конструкцию встроенных вентиляторов и методы их расчета. Реверсивность асинхронных двигателей массовых серий исключает возможность установки на входе и выходе из рабочего колеса направляющих аппаратов или диффузоров, а также требует применения только радиальных лопаток рабочего колеса. Быстроходность встроенных вентиляторов определяется частотой вращения машины, а не соображениями аэродинамической целесообразности. Кроме того, требования максимальной унификации узлов обуславливают применение на двигателях разной полюсности (разной частоты вращения) одинаковых вентиляционных узлов. В связи с тем, что с увеличением наружного диаметра рабочего колеса расход воздуха в любом случае возрастает, на всех двигателях частотой вращения до 1500 об/мин диаметр колеса принимается максимально возможным по конструктивным соображениям, а при больших частотах ограничивается требованиями акустики. Кроме того, число возможных конструктивных вариантов встроенных вентиляторов электрических машин не ограничено, а данные об исходных эмпирических коэффициентах для них практически отсутствуют. Поэтому методы первой группы при всей их внешней убедительности не представляют интереса для инженерных расчетов встроенных вентиляторов, хотя могут быть весьма полезными в исследованиях [77].

Методы второй группы ограничиваются турбинным уравнением Л. Эйлера (8-5), а дальше строятся на чисто эмпирической основе. Они проще, наглядней, их легче приспособить к какой-либо конкретной конструкции вентилятора, не вдаваясь в подробности физической картины потока в межлопаточном канале, поэтому в электромашиностроении преимущественное распространение получили методы второй группы. Ниже описываются наиболее обоснованные и распространенные из них.

Метод, рассмотренный в [73]. Для колес с радиальными лопатками турбинное уравнение Л. Эйлера (8-5) принимает вид:

$$H_T = \rho (u_2^2 - u_1^2).$$

В колесах с радиальными лопатками полный теоретический напор H_T складывается из равных частей статического и динамического напоров. У встроенных вентиляторов электрических машин, не имеющих диффузоров и спрямляющих аппаратов, 40% полного теоретического напора полезно не используется, и соответственно коэффициент реализации напора равен: $\eta_0 = 0,6$ [73]. Начальный напор вентилятора определяется выражением

$$H_0 = 0,6\rho (u_2^2 - u_1^2).$$

Для вентиляторов с загнутыми лопатками коэффициент реализации полного напора η_0 составляет: при лопатках, загнутых вперед, 0,75, при лопатках, загнутых назад, 0,5.

Статический напор при любом расходе Q рекомендуется определять по формуле

$$H_{ст} = H_0 (1 - Q^2/Q_{max}^2),$$

где Q_{max} — максимальный возможный расход при отсутствии внешнего сопротивления ($Z=0$).

Максимальный расход равен:

для вентиляторов с радиальными лопатками

$$Q_{max} = 0,42u_2s_2;$$

для лопаток, загнутых вперед,

$$Q_{max} = 0,5u_2s_2;$$

для лопаток, загнутых назад,

$$Q_{max} = 0,35u_2s_2.$$

Выходное сечение

$$s_2 = 0,92\pi D_2 b_2,$$

где b_2 — ширина лопатки.

Коэффициент 0,92 учитывает уменьшение площади выходного сечения за счет толщины лопаток. Рабочий

расход воздуха определяется графически методом наложения (см. рис. 8-1) или аналитически по формуле

$$Q_p = Q_{max} \sqrt{H_0 / (H_0 + ZQ_{max}^2)}.$$

Согласно [73] максимум к. п. д. примерно соответствует расходу $Q=0,5Q_{max}$, и на основании этого даются рекомендации по расчету геометрических параметров вентиляторов, необходимых для обеспечения заданного расхода воздуха при к. п. д., близких к максимальному. Таким образом, аэродинамическая характеристика вентилятора с радиальными лопатками описывается квадратичной параболой с определяющими параметрами H_0 и Q_{max} [73].

Метод, рассмотренный в [73], не учитывает такие важные параметры, как количество и форма лопаток, размеры входного отверстия, наличие диска и т. д. Очевидно, этот метод может давать удовлетворительные результаты лишь при некотором ограниченном варьировании параметров. Экспериментальная проверка этого метода на двигателях 4А со степенью защиты IP44 показала вполне удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных [78]. Например, среднее расхождение расходов воздуха составило 1,3%, что соответствует точности измерений. Исследования показали, что к. п. д. вентиляторов наружного обдува, применяющихся на двигателях серии 4А средней мощности, составляет 0,35—0,40 вместо 0,10—0,15, как считалось ранее. По результатам этих исследований можно указать следующие условия, при которых этот метод обеспечивает хорошие результаты:

- 1) кожух вентилятора должен иметь достаточно большой диаметр входного отверстия (сетки) $D_{сет}$, отвечающий соотношению $D_{сет}/D_2 \geq 0,8$;
- 2) ширина колеса должна уменьшаться к наружному диаметру и в самом широком месте соответствовать условию $b = (0,2 \div 0,3) D_2$;
- 3) количество лопаток рабочего колеса должно быть не менее семи — восьми;
- 4) рабочее колесо должно иметь хотя бы один диск диаметром $D_d = (0,65 \div 0,8) D_2$;
- 5) зазор между кромками лопаток и кожухом должен быть не более 0,15 ширины лопаток.

По существу это перечень элементарных требований, которые необходимо соблюдать для того, чтобы обеспечить интенсивный обдув станины при достаточно высоком к. п. д. вентилятора. В целом же вопрос относительно области корректного применения метода [73] требует дальнейших исследований.

Метод, рассмотренный в [74, 79, 80]. В основу расчета аэродинамических характеристик встроенных вентиляторов принята характеристика двух-

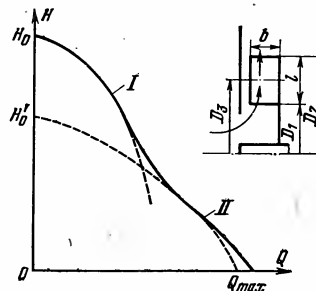


Рис. 8-9. Аэродинамическая характеристика двухдискового вентилятора по [74, 79, 80].

дискового вентилятора с прямоугольными радиальными лопатками и свободным входом. Такая характеристика имеет впадину в средней части и аппроксимируется двумя параболой I и II (рис. 8-9).

$$H = H_0 - ZQ^2;$$

$$H = H'_0 - Z'Q^2,$$

где H — рабочее давление вентилятора при расходе Q ; H_0 и H'_0 — начальное давление вентилятора при производительности $Q=0$ для парабол I и II соответственно; Z и Z' — гидравлическое сопротивление вентилятора для парабол I и II.

Переходный участок между этими параболой и участок параболы II, определяющий максимальный расход вентилятора Q_{max} (при $H=0$), аналитического выражения не имеют и выполняются произвольно.

Начальное давление для каждой параболы H_0 и H'_0 определяется как часть статического теоретического давления. При этом в отличие от метода, рассмотренного в [73], степень реализации теоретического давления является функцией длины, ширины и количества лопаток. Начальные давления H_0 и H'_0 и гидравлические сопротивления вентилятора Z и Z' определяются с использованием ряда вспомогательных функций и графиков; полученных экспериментально на двухдисковых вентиляторах с прямоугольными радиальными лопатками и

свободным входом и выходом воздуха. Как видно, рассматриваемый метод учитывает значительно больше факторов, чем описанный в [73], и соответственно является более универсальным. Он основан на обширном и хорошо обработанном экспериментальном материале. С некоторыми дополнительными оговорками он рекомендуется и для ряда вентиляторов другой конструкции.

Не умаляя достоинств этого метода, необходимо, однако, сделать следующие замечания:

1) встроенные вентиляторы электрических машин практически никогда не имеют свободного выхода, а работают в кожухе или в непосредственной близости от лобовых частей обмотки. Как следует из экспериментальных данных [82], в этом случае напорные характеристики рабочих колес утрачивают впадину в средней части, даже если лопатки имеют прямоугольную форму, и в связи с этим более точно аппроксимируются одной квадратичной параболой;

2) экспериментальные исследования [82] показывают, что появление впадины в средней части аэродинамической характеристики всегда является свидетельством неудовлетворительной геометрии проточной части рабочего колеса. При аппроксимации аэродинамических характеристик вентиляторов более или менее рациональной конструкции нет необходимости использовать две параболы. Следует отметить, что в конструкции вентиляторов с прямоугольными лопатками для двигателей со степенью защиты IP44 не учитываются условия неразрывности (сужение потока к наружному диаметру), а также условия выхода потока из рабочего колеса (в

осевом направлении, а не в радиальном), и поэтому они не относятся к числу рациональных по конфигурации проточной части.

Кроме того, попытки придать методу универсальность сделали его излишне громоздкими, неудобными для использования при исследовании вентиляционных систем. В частности, для

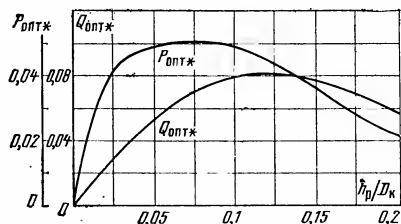


Рис. 8-10. Зависимость относительного оптимального расхода воздуха $Q_{\text{опт}}$ и забираемой вентилятором мощности $P_{\text{опт}}$ от относительной высоты ребра.

расчета вентиляторов наружного обдува рассматриваемый метод, по нашему мнению, не имеет существенных преимуществ по сравнению с методом, рассмотренным в [73].

Метод, рассмотренный в [77, 83]. Оптимальными аэродинамическими и энергетическими характеристиками обладает вентилятор наружного обдува, имеющий следующие геометрические размеры:

Внутренний диаметр вентиляционного кожуха

$$D_k = D_{\text{ст}} + 2h_p,$$

где $D_{\text{ст}}$ — диаметр станины без учета оребрения; h_p — высота охлаждающих ребер.

Наружный диаметр лопаток $D_2 = D_k$.

Внутренний диаметр лопаток $D_1 \leq 0,2D_2$.

Диаметр несущего диска $D_d = 0,8D_2$.

Угол наклона несущего диска $\alpha_1 = 20 \div 25^\circ$.

Число лопаток $Z_n = 5 \div 11$.

Длина вентиляционного кожуха $0,15D_k \leq a_1 \leq D_k$.

Диаметр входной сетки (предварительный) $D_c \approx 0,7D_k$.

Ширина лопаток $b = 0,25D_2$.

Для вентиляторов, выполненных в соответствии с этими требованиями, по рис. 8-10 определяются относительный оптимальный расход воздуха $Q_{\text{опт}*}$ и забираемая вентилятором мощность $P_{\text{опт}*}$. При несоблюдении оптимальных значений геометрических параметров расход воздуха и забираемая мощность рассчитываются по формулам:

$$Q_* = k_{Q1}, k_{Q2}, \dots, k_{Qn} Q_{\text{опт}*};$$

$$P_{\text{вен}*} = k_{P1}, k_{P2}, \dots, k_{Pn} P_{\text{опт}*},$$

где k_{Qn} , k_{Pn} — поправочные коэффициенты изменения расхода и мощности, забираемой вентилятором, при отклонении геометрических размеров от оптимальных значений, указанных выше.

Действительные значения расхода воздуха и забираемой мощности находятся по формулам:

$$Q_p = 4,11 \cdot 10^{-2} D_k^2 n Q_*;$$

$$P_{\text{вен}} = 1,34 \cdot 10^{-7} D_k^5 n^3 P_{\text{вен}*}.$$

В рассматриваемом методе значительное место уделяется выбору диаметра входной сетки исходя из следующих соображений. В проточной части работающего

вентилятора имеются зона с отрицательным давлением (на входе) и зона с положительным давлением (на выходе потока). Положение границы между этими зонами определяется частотой вращения, геометрией колеса, аэродинамическим сопротивлением сети и самого вентилятора и рядом других факторов. Во избежание рециркуляции воздуха на входе и с целью обеспечения оптимального режима работы вентилятора размеры входной сетки должны соответствовать размерам зоны с отрицательным давлением. Исходя из этого разработан специальный метод уточнения диаметра входной сетки.

Метод, рассмотренный в [77, 83], основан на обширном экспериментальном материале и учитывает большое количество факторов. Вместе с тем в нем недостаточно внимания уделяется профилированию лопаток рабочего колеса и кожуха. Известно, что конструкция рабочих колес вентиляторов значительно зависит от быстроходности и сопротивления сети, на которую они работают. У машин разной полюсности и разных высот оси вращения эти параметры могут отличаться на несколько порядков. Для вентиляторов с профилированными лопатками, спроектированных с учетом быстроходности и сопротивления сети, размеры зоны с отрицательным давлением и соответственно оптимальный диаметр входной сетки будут, очевидно, отличаться от рекомендуемых этим методом.

8-5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВСТРОЕННЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ НАРУЖНОГО ОБДУВА

Известно большое количество рекомендаций по оптимальным значениям отдельных параметров вентиляторов наружного обдува [75, 77, 84, 85]. Как правило, эти рекомендации разработаны на основании обширного экспериментального материала для конкретных условий работы вентилятора. Однако если сравнить вентиляторы наружного обдува, применяющиеся на машинах разных типов, то можно отметить, что они существенно отличаются друг от друга числом и формой лопаток, наличием или отсутствием диска, зазором между вентилятором и кожухом и другими важными параметрами.

Это свидетельствует о том, что проектировщики не всегда имеют достаточно ясное представление об основ-

ных требованиях к конструкции встроенных вентиляторов с точки зрения аэродинамики. Следует отметить, что только выполнение комплекса требований к геометрическим параметрам вентиляторов может обеспечить их высокие аэродинамические и другие качества. Можно, например, сделать оптимальным число лопаток и диаметр входа, но не выдержать требуемый зазор между рабочим колесом и кожухом, и это неизбежно приведет к ухудшению аэродинамических параметров вентилятора.

а) Общие требования к конструкции рабочего колеса

Основные геометрические параметры встроенных вентиляторов, определяющих их теоретическую характеристику (диаметр рабочего колеса и частота вращения), обычно почти однозначно определяются высотой оси вращения и числом полюсов машины. При определении других параметров, которые при проектировании являются предметом выбора, основная задача состоит в обеспечении минимальных внутренних потерь в вентиляторе.

Природа внутренних потерь в вентиляторе в основном аналогична природе потерь в любой другой вентиляционной сети. Соответственно и требования к конструкции вентилятора в значительной мере аналогичны требованиям к любой вентиляционной сети. Вместе с тем в вентиляторе эти потери происходят в специфических условиях, обусловленных вращением колеса, и поэтому целесообразно рассмотреть их более подробно. Следует отметить, что абсолютное значение большинства из этих потерь прямому экспериментальному определению не поддается и может быть найдено лишь весьма приближенно на основании поверочных расчетов по результатам моделирования [76].

Одними из главных потерь во вращающемся рабочем колесе являются потери на входе потока в лопаточные каналы. Они связаны с внезапным поворотом потока к передним кромкам, а затем — поворотом потока в плоскости вращения вслед за лопатками рабочего колеса. Снижению этих потерь способствуют увеличение сечения входа и уменьшение угла поворота потока. Отсюда вытекают три требования к конструкции вентилятора:

- 1) максимальный возможный диаметр входного отвер-

ствия в кожухе; 2) максимальная площадь входа в каждый межлопаточный канал; 3) коническая форма несущего диска и осевое направление входа в межлопаточные каналы, позволяющие уменьшить углы поворота потока.

Вторыми по значению являются потери срыва на рабочем колесе. Они аналогичны потерям при внезапном расширении и повороте канала и связаны с появле-

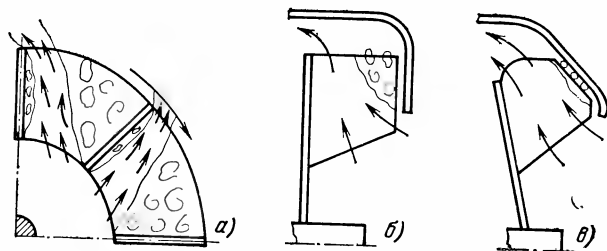


Рис. 8-11. Схемы образования вихревых зон в межлопаточном канале.

a — в плоскости вращения; *б, в* — перпендикулярно плоскости вращения при разных конструкциях вентилятора и кожуха.

нием вихревых зон и возникают вследствие того, что ядро потока, входящего в канал под углом к его оси, образует в этом канале собственный профиль, не совпадающий с профилем канала (рис. 8-11). Участки канала, не занятые ядром потока, заполняются вихрями, на поддержание которых расходуется энергия. Снижению этих потерь способствуют увеличение числа лопаток, придание профилю лопаток формы, повторяющей форму ядра потока, а также придание диску вентилятора конической формы. Очевидно, для уменьшения этих потерь ширина лопаток должна уменьшаться к наружному диаметру, а кожух вентилятора должен обеспечивать возможно более плавный переход от торцевой части к цилиндрической.

К числу определяющих относятся также потери, обусловленные циркуляцией воздуха через зазор между лопатками, с одной стороны, и кожухом вентилятора и подшипниковым щитом — с другой. Помимо снижения расхода воздуха, эти потери вызывают выравнивание давления по краям лопаток и уменьшают развиваемый

вентилятором напор. Потери сильно зависят от конструкции рабочего колеса, а также от зазоров. Для снижения этих потерь рабочее колесо вентилятора должно иметь задний несущий диск и минимально возможный зазор между передней кромкой лопаток и кожухом. Как показывают эксперименты [85], устройство заднего диска позволяет на 30—60% повысить расход воздуха при одновременном значительном повышении к. п. д. вентилятора. Следует отметить, что при наличии переднего диска исключается циркуляция воздуха между соседними межлопаточными каналами, но возникает перетечки воздуха между областью повышенного давления за колесом и входом в колесо. Относительное значение этих потерь растет с уменьшением размеров вентилятора и увеличением сопротивления вентиляционной сети. Соответственно с уменьшением высоты оси вращения двигателя должен уменьшаться зазор между передней кромкой лопаток вентилятора и кожухом.

Потери на трение в рабочем колесе складываются из потерь трения диска и потерь трения в межлопаточных каналах. Потери трения диска пропорциональны частоте вращения в кубе и диаметру диска в пятой степени. Они приобретают существенное значение в двухполюсных машинах и обуславливают необходимость уменьшения диаметра диска по сравнению с машинами большей полюсности. Потери на трение в межлопаточных каналах обратно пропорциональны их сечению, поэтому для снижения этих потерь целесообразно уменьшать количество лопаток и увеличивать их ширину.

Как видно, в большинстве случаев необходимость уменьшения потерь в рабочем колесе предъявляет однозначные требования к его конструкции: максимально возможный диаметр входа; конический несущий диск; уменьшение ширины лопаток к наружному диаметру; минимальные зазоры между кромками лопаток и кожухом; плавный переход от торцевой части кожуха к цилиндрической.

При определении диаметра входа D_c следует иметь в виду, что внутренний расчетный диаметр лопаток D_{lp} зависит от диаметра входа и с его уменьшением возрастает начальный напор вентилятора H_0 . Кроме того, во избежание рециркуляции воздуха на входе необходимо принимать во внимание размер зоны с отрицательным давлением [83].

Что касается количества и ширины лопаток, то из анализа потерь в рабочем колесе трудно дать однозначное заключение. Однако вопрос об оптимальной ширине и количестве лопаток рабочего колеса достаточно полно изучался экспериментально [77, 83, 85]. Установлено (рис. 8-12), что на двигателях средней мощности с частотой вращения до 3000 об/мин с увеличением количества лопаток до восьми—десяти все аэродинамические параметры вентилятора быстро улучшаются, а затем наступает насыщение [84]. Число лопаток z_l должно увеличиваться с уменьшением их относительной длины. Оптимальная ширина лопатки, по экспериментальным данным, составляет 0,2—0,25 D_2 .

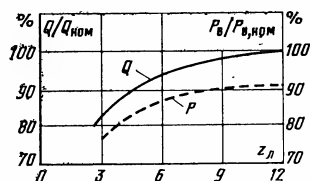


Рис. 8-12. Зависимости относительного расхода $Q/Q_{ном}$, мощности, забираемой вентилятором, $P_в/P_{в,ном}$ от числа лопаток рабочего колеса.

Переднюю кромку лопаток рабочего колеса целесообразно подрезать под углом, возрастающим с увеличением высоты оси вращения машины. Такая подрезка способствует увеличению сечения и улучшению условий входа потока в межлопаточные каналы. За рабочим колесом желательно иметь камеру для перераспределения потока между межреберными каналами, для чего у двигателей с большими высотами оси вращения целесообразно делать подрезку выходных кромок лопаток под углом 45—60° к плоскости вращения. Такая подрезка способствует также повороту потока из рабочего колеса к каналам станины.

Приведенные общие принципы проектирования вентиляционных узлов относятся к четырех-восьмиполусным двигателям средней мощности, преимущественно к двигателям с высотами оси вращения от 132 до 250 мм. При пользовании ими следует иметь в виду, что с уменьшением высоты оси вращения двигателя его аэродинамическое сопротивление быстро растет, а развиваемый вентилятором напор столь же быстро падает. В связи с этим целесообразно с уменьшением высоты оси вращения увеличивать относительную длину лопаток. В двигателях с высотами оси вращения 50—80 мм целесообразно уменьшение относительного диаметра входа.

В двигателях с высотами оси вращения до 132 мм с целью компенсации увеличения аэродинамического сопротивления целесообразно увеличивать число и длину лопаток, а зазор между лопатками и кожухом делать не более 3—4 мм.

При проектировании вентиляторов для двухполусных двигателей решающее значение имеют шумовые характеристики вентилятора, определяющие общий уровень шума этих машин, а с точки зрения потерь напора — потери на трение в рабочем колесе. В связи с этим для таких двигателей обычно делается рабочее колесо специальной конструкции с уменьшенными диаметрами лопаток и диска, которое, однако, должно вписываться в кожух, унифицированный для двигателей всех полюсностей. Как показали экспериментальные исследования, для снижения уровня вентиляционного шума количество лопаток у двухполусных двигателей должно быть в 1,5—2 раза меньше, чем у многополусных двигателей, а относительный наружный диаметр рабочего колеса должен уменьшаться с увеличением высоты оси вращения двигателя.

6) Распределение и использование воздуха в межреберных каналах станины

Полезное использование воздуха в двигателях с наружным обдувом происходит при движении его в межреберных каналах станины. Выходящий из-под кожуха поток воздуха по мере движения в каналах тормозится за счет трения о стенки канала и обмена импульсами с окружающей неподвижной средой. В результате этого поперечное сечение воздушного потока линейно увеличивается, а его скорость соответственно снижается. При этом торможение струи происходит тем быстрее, чем меньше сечение канала (плотнее обребрение, меньше габарит двигателя). В этих отношениях поток воздуха в межреберных каналах станины подобен полуограниченной затопленной струе [86].

Детальные исследования [87] показали, однако, что поток воздуха в межреберных каналах двигателей имеет более сложную структуру, чем просто полуограниченная затопленная струя. Поток охлаждающего воздуха выходит из вентилятора в межреберные каналы закрученным под углом 40—50°. По мере движения от кромки кожуха

ядро потока 2—3 раза последовательно отражается от боковых стенок канала — ребер (рис. 8-13, а). Кроме того, на входе в межреберные каналы вращающийся поток воздуха поджат центробежными силами к кожуху. В связи с этим характер потока по выходе из-под кожуха значительно зависит от соотношения диаметров оребрения станины и кожуха.

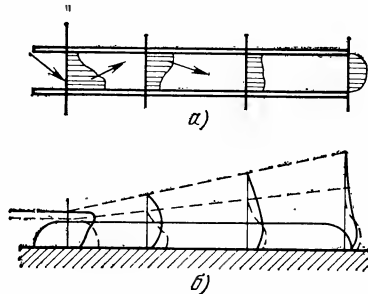


Рис. 8-13. Схемы движения ядра воздушного потока в межреберных каналах станины.

реберные каналы, и в теплообмене двигателя не участвует. При отсутствии зазора распределение скоростей в сечении становится более равномерным и полезное использование воздуха повышается (рис. 8-13, б). Как показали экспериментальные исследования, на двигателях с высотой оси вращения более 112 мм целесообразно диаметр кожуха делать несколько меньше диаметра оребрения станины, уменьшая высоту ребер в месте посадки кожуха. При этом, помимо повышения полезного использования воздуха, возрастает его скорость в каналах и на 15—30% уменьшаются затраты мощности на вентиляцию [88].

Исследованиями установлено также, что распределение воздуха по окружности станины является несимметричным (рис. 8-14). Наличие на входе в межреберные каналы приливов для крепления подшипникового щита приводит к образованию за ними аэродинамических теней, в зоне которых скорость обдува станины значительно меньше, чем в незатененных ребрах. Кроме того, поджатие кожуха снизу и наличие неоребранных участков станины в зоне лап приводит к тому, что эпюра распределения скоростей по окружности приобрета-

ет вид спирали, раскручивающейся по направлению вращения. Лучше обдувается та часть станины, которая по ходу вращения вентилятора расположена перед поджатием кожуха, причем различие в скорости обдува ребер, расположенных по разные стороны от места поджатия кожуха, достигает 20—30%. Более того, наблю-

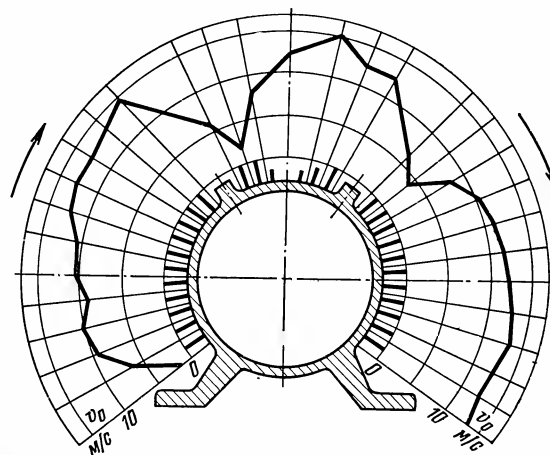


Рис. 8-14. Распределение средней скорости воздуха по межреберным каналам станины.

дения показывают, что через неоребранный участок станины, расположенный по ходу вращения вентилятора за поджатием кожуха, происходит подсос воздуха под кожух со стороны станины. Очевидно, что и охлаждение двигателя тоже является несимметричным, и при измерении температуры активных частей локальными датчиками их показания зависят от направления вращения ротора.

Исследования свидетельствуют также, что поджатие кожуха и наличие неоребранных участков отражаются на работе вентилятора. Межлопаточные каналы вентилятора, которые при вращении оказываются против поджатия, практически не работают из-за отсутствия выхода для воздуха. Для устранения этих вредных явлений необходимо, очевидно, более равномерно оребрять станину и уменьшать поджатие кожуха снизу.

в) Рекомендации по конструкции вентиляторов наружного обдува

Настоящие рекомендации разработаны на основании обширных экспериментальных исследований, выполненных рядом организаций на двигателях серий A02 и 4A, и приводятся в качестве примера конкретного применения указанных ранее общих принципов проектирования вентиляторов наружного обдува. Чтобы эти реко-

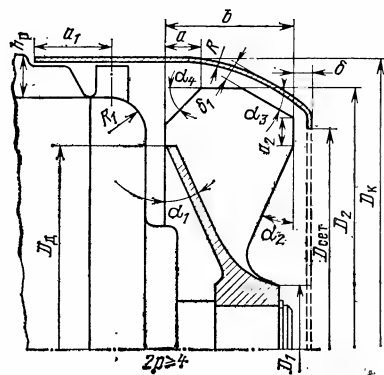


Рис. 8-15. Схема вентиляционного узла четырех — восьмиполюсных двигателей.

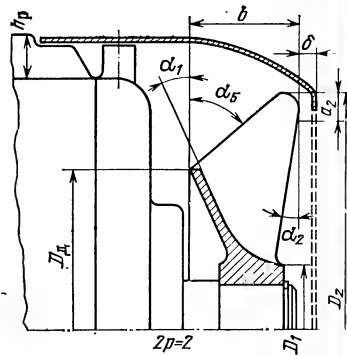


Рис. 8-16. Схема вентиляционного узла двухполюсных двигателей.

мендации можно было использовать на возможно более ранней стадии проектирования, большинство геометрических параметров вентиляторов выражено в долях высоты оси вращения h .

На рис. 8-15 и 8-16 приведены схемы вентиляционных узлов двигателей с $2p \geq 4$ и $2p = 2$ соответственно с обозначением геометрических размеров вентиляторов, а в табл. 8-2 даны рекомендуемые значения этих размеров. Как видно, двигатели всех полюсностей имеют унифицированный кожух. Практически одинаковые относительные значения входной решетки $D_{\text{сет}}$ и радиуса R обеспечивают геометрическое подобие и одинаковый внешний вид кожухов вентиляторов. Изменением угла α_2 , а также a и углов α_4 и α_5 обеспечивается плавное уменьшение относительной длины лопаток рабочего колеса с увеличением высоты оси вращения и

Таблица 8-2

h, mm	$2p$	D_2	b	D_A	D_K	D_{cer}	a	a_1	a_2	R	R_t	δ, mm	δ_{11}, mm	α_1	α_3	α_5	z_T
50—63	$\frac{2}{\geq 4}$	1,8h	0,35h	1,4h	2h*	1,35h	—	1,5h _p	0,1h	0,8h	0,15h	4	3	—	30—35	—	8
71—80	$\frac{2}{\geq 4}$	1,8h	0,44h	1,4h	2h*	1,4h	—	1,5h _p	0,1h	0,8h	0,15h	6	5	—	$\frac{30-35}{—}$	$\frac{45}{—}$	$\frac{5}{8}$
90—100	$\frac{2}{\geq 4}$	1,8h	0,44h	1,4h	2h*	1,55h	—	1,5h _p	0,1h	0,75h	0,15h	6	6	—	$\frac{30-35}{—}$	$\frac{45}{—}$	$\frac{5}{8}$
112—132	$\frac{2}{\geq 4}$	$\frac{1,7h}{1,8h}$	0,44h	$\frac{1,3h}{1,4h}$	2h*	1,55h	$\frac{—}{0,12h}$	1,5h _p	0,1h	0,75h	0,15h	8	6	—	$\frac{30-45}{—}$	$\frac{30-45}{—}$	$\frac{5}{8}$
160	$\frac{2}{\geq 4}$	$\frac{1,6h^{**}}{1,8h}$	$\frac{0,375h}{0,44h}$	$\frac{1,1h}{1,4h}$	2h	1,50h	$\frac{—}{0,12h}$	1,5h _p	0,1h	0,7h	0,15h	10	7	—	$\frac{10-15}{30-45}$	$\frac{50}{—}$	$\frac{5}{8}$
180—200	$\frac{2}{\geq 4}$	$\frac{1,6h^{**}}{1,8h}$	$\frac{0,375h}{0,44h}$	$\frac{1,1h}{1,4h}$	2h	1,50h	$\frac{—}{0,12h}$	1,5h _p	0,1h	0,7h	0,15h	10	7	—	$\frac{10-15}{30-35}$	$\frac{50}{—}$	$\frac{5}{8}$
225—250	$\frac{2}{\geq 4}$	$\frac{1,6h^{**}}{1,8h}$	$\frac{0,375h}{0,44h}$	$\frac{1,1h}{1,4h}$	2h	1,50h	$\frac{—}{0,20h}$	1,5h _p	0,1h	0,7h	0,15h	12	10	—	$\frac{10-15}{30-35}$	$\frac{50}{—}$	$\frac{5}{8}$

* Выбрана при построении контура кожура в зависимости от λ_p .

*** Уточняется с учетом обеспечения радиального зазора δ_1 .
Размеры δ и δ_1 — в миллиметрах, углы — в градусах.

уменьшением полюсности двигателей. Двигатели малых высот оси вращения имеют уменьшенный диаметр входной сетки и уменьшенную ширину лопаток.

г) Вентиляционный расчет двигателей со степенью защиты IP44

1. Расчет аэродинамической характеристики вентилятора

Исходными данными для расчета являются:

Внутренний расчетный диаметр лопатки, м	D_{1p}
Наружный расчетный диаметр лопатки, м	D_{2p}
Ширина лопатки вентилятора (максимальная), м	b
Частота вращения, об/мин	n
Плотность воздуха, кг/м ³	$\rho = 1,17$

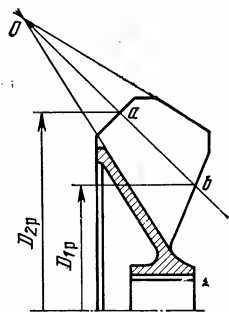


Рис. 8-17. Схема графического определения расчетных диаметров рабочего колеса.

Для вентиляторов со сложным профилем лопатки (рис. 8-15, 8-16) расчетные диаметры определяются графически (рис. 8-17). Образующие диска и боковой кромки лопатки продолжают до пересечения в точке 0 (рис. 8-17). За расчетные диаметры принимаются диаметры расположения точек a и b , образованных пересечением биссектрисы с задней и передней кромками лопаток.

Начальное давление вентилятора

$$H_0 = 0,695 \cdot 10^{-3} n^2 (D_{2p}^2 - D_{1p}^2).$$

Максимальный расход воздуха

$$Q_{max} = 6 \cdot 10^{-3} D_{2p}^2 b n.$$

Уравнение аэродинамической характеристики

$$H = H_0 (1 - Q^2/Q_{max}^2).$$

2. Расчет аэродинамического сопротивления вентиляционной сети

Исходные данные (рис. 8-18):

Суммарная площадь отверстий в сетке кожуха, м ²	$S_{отв}$
Общая площадь сетки кожуха, м ²	S_0

Площадь сечения в месте поворота к рабочему колёсу, м ²	S_1
Угол поворота потока к входным кромкам лопаток рабочего колеса	α_1
Площадь сечения в месте поворота потока перед входом в межреберные каналы, м ²	S_2
Угол поворота потока при входе в межреберные каналы, град	α_2
Площадь сечения перед входом в межреберные каналы, м ²	S_3
Площадь сечения межреберных каналов от станины до кожуха вентилятора, м ²	S_4
Угол натекания потока на ребра станины	$\varphi = 45^\circ$
Угол поворота потока в межреберных каналах	$\varphi_1 = 90^\circ$

Сопротивление входа в кожух через решетку с острыми кромками

$$Z_1 = \xi \frac{\rho}{2S_{отв}^2},$$

где ξ_1 — коэффициент местного сопротивления при входе потока через решетку с острыми кромками.

Сопротивление поворота потока за входной решеткой перед входом в вентилятор

$$Z_2 = \xi_2 \frac{\rho}{2S_1^2},$$

где ξ_2 — коэффициент сопротивления поворота потока.

Сопротивление поворота потока за вентилятором перед входом в межреберные каналы

$$Z_3 = \xi_3 \frac{\rho}{2S_2^2},$$

где ξ_3 — коэффициент сопротивления поворота потока.

Сопротивление косого входа в межреберные каналы

$$Z_4 = \xi_4 \frac{\rho}{2S_{41}^2},$$

где ξ_4 — коэффициент сопротивления при внезапном сужении канала; $S_{41} = S_4 \cos \varphi$ — расчетная площадь входа в межреберные каналы.

Сопротивление поворота потока в межреберных каналах под кожухом

$$Z_5 = \xi_5 \frac{\rho}{2S_4^2},$$

где ξ_5 — коэффициент сопротивления поворота потока.

Сопротивление выхода потока из межреберных каналов в свободное пространство

$$Z_6 = \xi_6 \frac{\rho}{2S_4^2},$$

где ξ_6 — коэффициент сопротивления внезапного расширения. Коэффициенты сопротивления ξ_1 — ξ_6 определяются по [69].

Суммарное сопротивление вентиляционной сети двигателя

$$Z_0 = (1,1 \div 1,3) (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6).$$

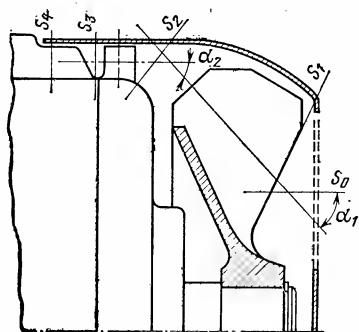


Рис. 8-18. Схема расчетных сечений и углов поворота потока.

Рабочий расход воздуха

$$Q_p = Q_{max} \sqrt{H_0 / (H_0 + Z_0 Q_{max}^2)}.$$

Рабочий напор вентилятора

$$H_p = Z_0 Q_p^2.$$

Средняя скорость воздуха в межреберных каналах

$$v_c = K \frac{Q_p}{s_4},$$

где K — коэффициент использования воздуха в межреберных каналах [78]. Для двигателей 4A160 и 4A180 $K=0,80$; для двигателей 4A200 $K=0,85$; для двигателей 4A225 $K=0,90$.

Потребляемая вентилятором мощность

$$P_{вен} = 9,81 \frac{H_p Q_p}{\eta},$$

где η — к.п.д. вентилятора; $\eta=0,40$ для двигателей 4A160 и 4A180; $\eta=0,35$ для двигателей 4A200 и 4A225 [78].

Вопросы моделирования и подобия вентиляторов

При разработке серийных асинхронных двигателей связи с отсутствием сколько-нибудь удовлетворительной теории и специфическими условиями работы геометрические параметры вентиляторов обычно определяются эмпирически, путем сравнения результатов испытаний серии опытных образцов. При выборе вариантов и методов испытаний необходимо выполнять три главных правила:

1) ряд моделей вентиляторов, предназначенных для испытаний, должен отражать какую-либо определенную инженерную идею, связанную с новыми физическими представлениями о характере аэродинамических процессов в вентиляторе или в системе охлаждения двигателя в целом;

2) в программе испытаний должна быть заложена определенная система, предусматривающая выявление влияния одного интересующего параметра при сохранении неизменными всех других параметров вентилятора;

3) до начала экспериментальных работ необходимо убедиться в том, что чувствительность принятых методов и средств измерений обеспечивает однозначность результатов.

После анализа результатов и выбора более или менее удовлетворительного варианта вентилятора для данной машины обычно возникает вопрос о применении аналогичных вентиляторов для электрических машин других высот оси вращения. Для пересчета геометрических параметров вентиляторов известными методами [76] необходимо знать аэродинамическую характеристику выбранного вентилятора, а также действительное аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети соответствующих двигателей. Экспериментальное определение этих показателей на электрических машинах достаточно трудоемко и требует специфического оборудования, которое не всегда доступно организациям, занимающимся разработкой электрических машин.

Хотя существующие методы расчета встроенных вентиляторов далеки от совершенства, тем не менее, если расчет ряда вентиляторов производить одним методом, то у геометрически подобных вентиляторов степень расхождения между соответствующими действительными и расчетными параметрами будет пример-

но одинакова. Если, например, в качестве определяющего параметра принять наружный диаметр лопаток, то для подобных вентиляторов в соответствии с изложенным будут действительны равенства:

$$D_2/D_{2p} = D'_2/D'_{2p} = \dots = k = \text{idem}, \quad (8-9)$$

где D_2 , D'_2 и D_{2p} , D'_{2p} — соответственно действительные и расчетные наружные диаметры лопаток подобных вентиляторов.

Аналогично

$$b/D_2 = b'/D'_2 = \dots = \varphi = \text{idem}; \quad (8-10)$$

$$D_1/D_2 = D'_1/D'_2 = \dots = \psi = \text{idem}, \quad (8-11)$$

где b , b' и D_1 , D'_1 — ширины и внутренние диаметры лопаток подобных вентиляторов.

Указанное положение позволяет предложить метод пересчета геометрических параметров подобных вентиляторов для ряда подобных по конструкции электрических машин по результатам экспериментального определения параметров вентилятора для одной машины данного ряда. Если воспользоваться методикой [73], то для расчета диаметра D_{2p} можно применить формулу [89]

$$D_{2p} = \sqrt[4]{\beta + \frac{\sqrt{\beta^2 + 4\alpha\gamma}}{2\alpha}}, \quad (8-12)$$

где $\alpha = 2,08 \cdot 10^{-4} n^2 \varphi^2 (1 - \psi^2)$; $\beta = Z \varphi^2 Q_p^2$; $\gamma = 5,17 \cdot 10^{-2} \times \times \varphi^2 (1 - \psi^2) Q_p^2$.

В соответствии с этим методом сначала по (8-12) вычисляется значение D_{2p} для испытанного вентилятора и находится поправочный коэффициент k (8-9). По (8-12) определяется расчетный диаметр D_{2p} для проектируемого вентилятора. При этом необходимую производительность проектируемого вентилятора с достаточной для практики точностью можно определить по формуле

$$Q_{p1} = Q_p \frac{P_{\text{вен1}} s h'_{a1} (1/\eta_1 - 1)}{P_{\text{вен}} s_1 h_{a1} (1/\eta - 1)},$$

где $P_{\text{вен}}$, s , η и h_{a1} — мощность, обдуваемая поверхность, к.п.д. и высота спинки статора соответственно для испытанной и проектируемой машины.

Умножив теперь расчетный диаметр вентилятора проектируемого двигателя на поправочный коэффициент k , получим искомый фактический диаметр вентилятора этого двигателя.

Пересчет геометрических параметров вентиляторов методами подобия, в том числе и описанным выше методом, может применяться лишь для вентиляторов, разница в размерах которых не превышает 30%, так как в противном случае на характеристики подобных вентиляторов существенное влияние оказывают масштабные эффекты. Модели вентиляторов для двухполусных двигателей должны испытываться при отклонении частоты вращения от номинальной не более 30%.

Глава девятая ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

9-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе сопровождается потерями энергии. Теплота, создаваемая этими потерями, нагревает активные и конструктивные элементы двигателя, повышает их температуру. Задачей теплового расчета является определение средней температуры активных частей двигателя и в ряде случаев — расчет максимальной температуры и поля температуры в машине. Исходными данными при тепловом расчете являются следующие: распределение потерь энергии в элементах двигателя, значения физических постоянных — теплопроводности, теплоемкости и др. и условия теплопередачи на граничных поверхностях.

В соответствии с режимами работы асинхронного двигателя различают расчеты установившегося и не установившегося теплового режима.

9-2. МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПРИ УСТАНОВИВШИХСЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ

В современной практике проектирования и исследования асинхронных двигателей применяются следующие методы тепловых расчетов установившихся тепловых режимов: аналитический метод или метод темпе-

ратурного поля; метод эквивалентных тепловых схем; метод эквивалентных греющих потерь.

а) Метод температурных полей

Асинхронный двигатель в тепловом отношении представляет собой сложную систему, состоящую из многих элементов, в каждом из которых стационарное температурное поле описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

для элементов машины с внутренними источниками теплоты

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ix} \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{iy} \frac{\partial \theta_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{iz} \frac{\partial \theta_i}{\partial z} \right) + q_i(x, y, z) = 0; \quad (9-1)$$

для элементов без внутренних источников теплоты

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ix} \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{iy} \frac{\partial \theta_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{iz} \frac{\partial \theta_i}{\partial z} \right) = 0, \quad (9-2)$$

где θ_i — температура i -го элемента; λ_{ix} , λ_{iy} , λ_{iz} — коэффициенты теплопроводности i -го элемента в направлении осей координат; q_i — удельная мощность (производительность) источника тепла в i -м элементе.

Граничные условия, задающие закон взаимодействия между поверхностью тела и окружающей средой, могут быть представлены в следующем виде:

граничные условия первого рода

$$\theta_{in} = f(x, y, z); \quad (9-3)$$

граничные условия второго рода

$$(\partial \theta_i / \partial n)_r = \varphi(x, y, z); \quad (9-4)$$

граничные условия третьего рода

$$\left(\frac{\partial \theta_i}{\partial n} \right)_r = - \frac{\alpha_i}{\lambda_{in}} (\theta_{ir} - \theta_{0i}); \quad (9-5)$$

граничные условия четвертого рода

$$\lambda_{in} \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial n} \right)_r = \lambda_{(i-1)n} \left(\frac{\partial \theta_{i-1}}{\partial n} \right)_r; \quad (9-6)$$

здесь θ_{ir} — температура поверхности i -го элемента; θ_{0i} — температура окружающей среды, связанной с i -м элементом; α_i — коэффициент теплоотдачи с поверхности i -го элемента; n — нормаль к поверхности i -го элемента.

В большинстве случаев уравнения теплопроводности имеют более простой вид, чем выражения (9-1) и (9-2). Применительно к асинхронным двигателям теплопередача в большинстве случаев определяется внешним теплообменом между элементами машины и охлаждающей средой. Такие задачи описываются либо уравнениями вида (9-5), либо критериальными уравнениями теплообмена [94].

Задачи расчета нагрева, включающие в себя решения уравнений (9-1) — (9-6) для различных элементов машины с учетом их взаимной связи, естественно было бы считать основой теплового расчета. Однако следует иметь в виду, что решение дифференциальных уравнений приводит к сложным и громоздким формулам, использование которых не всегда целесообразно, если учитывать некоторую неопределенность исходных данных: распределение потерь энергии в машине, погрешности вентиляционного расчета и т. д. [67].

Метод температурных полей применяется в основном для решения специальных частных задач нагрева элементов электрических машин, для определения характерных изменений температуры в различных направлениях, для определения наиболее нагретых точек элементов машины и т. д. [97, 101].

б) Метод эквивалентных тепловых схем

Метод эквивалентных тепловых схем (метод ЭТС) основан на аналогии тепловых потоков и электрических токов. Эта аналогия основана на единой форме уравнений теплообмена (закон Фурье) $P = \Delta \theta \Lambda$ и электрического тока (закон Ома) $I = UG$. В тепловых схемах замещения разность температур $\Delta \theta = (\theta_1 - \theta_2)$ соответствует разности потенциалов U , тепловой поток P — электрическому току I , тепловая проводимость Λ — электрической проводимости G . Основное допущение метода ЭТС состоит в замене действительных распределенных источников теплоты и тепловых проводимостей сосредоточенными, причем последние принимаются по-

Таким образом, электрическую машину в общем случае можно условно разделить на n однородных элементов с внутренними источниками теплоты мощностью $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ (равной потерям в этих элементах) и с температурами $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_n$ соответственно. Эти элементы связаны между собой тепловыми проводимостями:

При этом примем, что отвод теплоты в охлаждающую среду происходит от тела n , связанного с этой средой проводимостью Λ_{no} . В соответствии с вышеизложенным для такой ЭТС можно записать систему линейных алгебраических уравнений:

[illegible]

По методу ЭТС определяют значения средних температур элементов двигателя и их изменение при варьировании параметров электротехнических материалов, условий охлаждения и т. д., и поэтому этот метод является предпочтительным при проектировании. Недостаток этого метода заключается в трудности определения тепловых проводимостей и расчета системы уравнений при значительном числе тел в эквивалентной схеме. В последнее время находит применение совместное использование методов ЭТС и температурных полей [68, 101]. Это дает возможность провести анализ темпера-

257

и потери в пазовой части

$$P_{мп} = P_{м1} \frac{l_1}{l_1 + l_{л1}}; \quad (9-10)$$

2) потери в роторе, включающие в себя основные и добавочные потери в обмотке и добавочные потери в зубцах,

$$\sum P_{м2} = P_{м2} + \sum_v (P_{доб,мв} + P_{повв} + P_{см2в} + P_{м2q}); \quad (9-11)$$

3) потери в спинке статора P_{a1} ;

4) основные и добавочные потери в зубцах статора:

$$\sum P_{z1} = (P_c - P_{a1}) + \sum_{\mu} (P_{1пул\mu} + P_{1пов\mu}); \quad (9-12)$$

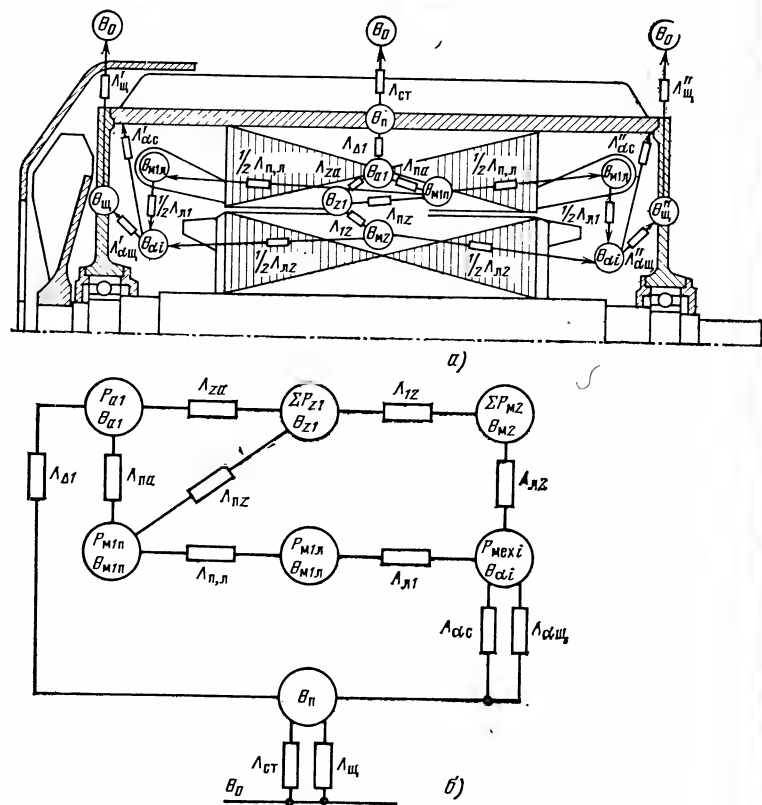


Рис. 9-1. Картина теплопередачи (а) и упрощенная тепловая схема замещения (б).

5) внутренние механические потери $P_{мехi}$, включающие в себя потери на трение в подшипниках и трение ротора о воздух.

Тепловые потоки распространяются в двигателе в следующих основных направлениях.

Тепловой поток пазовой части обмотки статора передается лобовым частям (тепловая проводимость $\Lambda_{л,л}$), зубцам и спинке сердечника статора (проводимости $\Lambda_{пз}$ и $\Lambda_{па}$).

Тепловой поток с лобовых частей обмотки статора передается внутреннему воздуху (тепловая проводимость $\Lambda_{л1}$).

Тепловой поток от пазовой части обмотки ротора через ротор и статор передается зубцам статора (проводимость Λ_{12}). Тепловой поток от торцевых частей ротора передается внутреннему воздуху (проводимость $\Lambda_{л2}$). Тепловые потоки от ротора и пазовой части обмотки статора соединяются с тепловым потоком, возникшим от потерь в сердечнике статора, и этот суммарный тепловой поток передается станине асинхронного двигателя (проводимость $\Lambda_{\Delta 1}$). Внутренний воздух отдает теплоту оболочке двигателя (проводимости $\Lambda'_{\alphaщ}$, $\Lambda'_{\alphaщ}$, $\Lambda'_{\alphaст}$, $\Lambda'_{\alphaст}$), которая в свою очередь передает теплоту охлаждающему воздуху (проводимости $\Lambda''_{щ}$, $\Lambda''_{щ}$, $\Lambda_{ст}$).

Примем следующие допущения:

1) в поперечном сечении машины отсутствует перемещение теплоты, что позволяет рассматривать двумерную задачу в продольном сечении машины;

2) обмотка статора заменяется эквивалентным стержнем, температура которого в поперечном сечении равна средней температуре отдельных проводников;

3) коэффициенты теплопроводности материалов и воздуха постоянны и равны средним значениям для диапазона рабочих температур;

4) теплопередачей через вал пренебрегаем;

5) сердечники статора и ротора проводят теплоту только в радиальном направлении;

6) пренебрегаем тепловым сопротивлением между станиной и щитами двигателя.

Перечисленные допущения дают незначительную погрешность и возможны для практических расчетов.

б) Тепловая схема замещения, основные уравнения и их решение

Из анализа картины теплопередачи двигателя (рис. 9-1, а) может быть составлена упрощенная тепловая схема замещения (рис. 9-1, б). Схема состоит из семи тел: спинки статора со средней температурой Θ_{a1} ; зубцов статора со средней температурой Θ_{z1} ; пазовой части обмотки статора со средней температурой $\Theta_{m1п}$; лобовой части обмотки статора со средней температурой $\Theta_{m1л}$; ротора со средней температурой Θ_{m2} ; внутреннего воздуха со средней температурой $\Theta_{\alpha i}$; оболочки со средней температурой $\Theta_{п}$.

Тела связаны между собой соответствующими тепловыми проводимостями (рис. 9-1, а). Для такой схемы может быть составлена система из семи уравнений. Принимая $\Theta_0 = 0$, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{a1}(\Lambda_{\Delta 1} + \Lambda_{па} + \Lambda_{za}) - \Theta_{z1}\Lambda_{za} - \\ - \Theta_{п}\Lambda_{\Delta 1} - \Theta_{m1п}\Lambda_{па} &= P_{a1}; \\ \Theta_{z1}(\Lambda_{za} + \Lambda_{пз} + \Lambda_{12}) - \Theta_{a1}\Lambda_{za} - \\ - \Theta_{m1п}\Lambda_{пз} - \Theta_{z1}\Lambda_{12} &= \Sigma P_{z1}; \\ \Theta_{m1п}(\Lambda_{па} + \Lambda_{пз} + \Lambda_{п,л}) - \Theta_{a1}\Lambda_{па} - \\ - \Theta_{z1}\Lambda_{пз} - \Theta_{m1л}\Lambda_{п,л} &= P_{m1п}; \\ \Theta_{m1л}(\Lambda_{п,л} + \Lambda_{л1}) - \Theta_{m1п}\Lambda_{п,л} - \\ - \Theta_{\alpha i}\Lambda_{л1} &= P_{m1л}; \\ \Theta_{m2}(\Lambda_{12} + \Lambda_{л2}) - \Theta_{z1}\Lambda_{12} - \Theta_{\alpha i}\Lambda_{л2} &= \Sigma P_{m2}; \\ \Theta_{\alpha i}(\Lambda_{л1} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{\alpha ст} + \Lambda_{\alpha ш}) - \Theta_{m1л}\Lambda_{л1} - \\ - \Theta_{m2}\Lambda_{л2} - \Theta_{п}(\Lambda_{\alpha ст} + \Lambda_{\alpha ш}) &= P_{мех i}; \\ \Theta_{п}(\Lambda_{\Delta 1} + \Lambda_{ст} + \Lambda_{ш} + \Lambda_{\alpha ст} + \Lambda_{\alpha ш}) - \\ - \Theta_{a1}\Lambda_{\Delta 1} - \Theta_{\alpha i}(\Lambda_{\alpha ст} + \Lambda_{\alpha ш}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9-13)$$

Для снижения порядка системы уравнений (9-13) сначала определим превышение температуры тел над температурой оболочки:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Theta'_{a1} &= \Theta_{a1} - \Theta_{п}; \\ \Delta\Theta'_{z1} &= \Theta_{z1} - \Theta_{п}; \\ \Delta\Theta'_{m1п} &= \Theta_{m1п} - \Theta_{п}; \end{aligned} \right\} \quad (9-14)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Theta'_{m1л} &= \Theta_{m1л} - \Theta_{п}; \\ \Delta\Theta'_{m2} &= \Theta_{m2} - \Theta_{п}; \\ \Delta\Theta'_{\alpha i} &= \Theta_{\alpha i} - \Theta_{п}. \end{aligned} \right\}$$

Введя обозначения:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\Delta 1} + \Lambda_{па} + \Lambda_{za} &= \Lambda_{11}; \\ \Lambda_{za} + \Lambda_{пз} + \Lambda_{12} &= \Lambda_{22}; \\ \Lambda_{па} + \Lambda_{пз} + \Lambda_{п,л} &= \Lambda_{33}; \\ \Lambda_{п,л} + \Lambda_{л1} &= \Lambda_{44}; \\ \Lambda_{12} + \Lambda_{л2} &= \Lambda_{55}; \\ \Lambda_{л1} + \Lambda_{л2} + \Lambda_{\alpha i} &= \Lambda_{66}; \\ \Lambda_{\alpha ст} + \Lambda_{\alpha ш} &= \Lambda_{\alpha i}; \\ \Lambda_{ст} + \Lambda_{ш} &= \Lambda_{п}. \end{aligned}$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Theta'_{a1}\Lambda_{11} - \Delta\Theta'_{z1}\Lambda_{za} - \Delta\Theta'_{m1п}\Lambda_{па} &= P_{a1}; \\ \Delta\Theta'_{z1}\Lambda_{22} - \Delta\Theta'_{a1}\Lambda_{za} - \Delta\Theta'_{m1п}\Lambda_{пз} - \\ - \Delta\Theta'_{z1}\Lambda_{12} &= \Sigma P_{z1}; \\ \Delta\Theta'_{m1п}\Lambda_{33} - \Delta\Theta'_{a1}\Lambda_{па} - \Delta\Theta'_{z1}\Lambda_{пз} - \\ - \Delta\Theta'_{m1л}\Lambda_{п,л} &= P_{m1п}; \\ \Delta\Theta'_{m1л}\Lambda_{44} - \Delta\Theta'_{m1п}\Lambda_{п,л} - \Delta\Theta'_{\alpha i}\Lambda_{л1} &= P_{m1л}; \\ \Delta\Theta'_{m2}\Lambda_{55} - \Delta\Theta'_{z1}\Lambda_{12} - \Delta\Theta'_{\alpha i}\Lambda_{л2} &= \Sigma P_{m2}; \\ \Delta\Theta'_{\alpha i}\Lambda_{66} - \Delta\Theta'_{m1л}\Lambda_{л1} - \Delta\Theta'_{m2}\Lambda_{л2} &= P_{мех i}. \end{aligned} \right\} \quad (9-15)$$

Превышение температуры оболочки над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\Theta_{п} = \frac{P_{a1} + \Sigma P_{z1} + P_{m1п} + P_{m1л} + \Sigma P_{m2} + P_{мех i}}{\Lambda_{п}}. \quad (9-16)$$

Тогда превышение температуры активных частей

машины над температурой охлаждающей среды составляет:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{a1} &= \Delta\theta'_{a1} + \Delta\theta_{\pi} + 0,5\Delta\theta_0; \\ \Delta\theta_{z1} &= \Delta\theta'_{z1} + \Delta\theta_{\pi} + 0,5\Delta\theta_0; \\ \Delta\theta_{m1\pi} &= \Delta\theta'_{m1\pi} + \Delta\theta_{\pi} + 0,5\Delta\theta_0; \\ \Delta\theta_{m1л} &= \Delta\theta'_{m1л} + \Delta\theta_{\pi} + 0,5\Delta\theta_0; \\ \Delta\theta_{m2} &= \Delta\theta'_{m2} + \Delta\theta_{\pi} + 0,5\Delta\theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (9-17)$$

Подогрев наружного охлаждающего воздуха отводимой теплотой:

$$\Delta\theta_0 = \Sigma P / c_0 \rho Q_p, \quad (9-18)$$

c_0 — удельная теплоемкость охлаждающего воздуха; ρ — плотность воздуха; Q — расход.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\theta_{m1} = (\Delta\theta_{m1\pi} l_1 + \Delta\theta_{m1л} l_{л1}) / l_1 + l_{л1}. \quad (9-19)$$

Схемы замещения асинхронных двигателей общего назначения с другими способами охлаждения и степенями защиты приведены на рис. 9-2, а—в.

в) Расчет тепловых проводимостей

Для решения системы (9-15) и определения превышения температуры активных частей двигателя необходимо знать значения тепловых проводимостей. Вопросы расчета тепловых проводимостей элементов асинхронного двигателя достаточно подробно изложены в [68, 101].

1. Общая тепловая проводимость между сердечником статора и станиной

$$\Lambda_{\Delta 1} = \frac{1}{1/\Lambda_{a1} + 1/\Lambda_{a\Delta 1} + 1/\Lambda_{ct}}, \quad (9-20)$$

где Λ_{a1} — тепловая проводимость спинки статора,

$$\Lambda_{a1} = \pi l_1 \lambda_{c1} k_{c1} \frac{2D_{a1} - h_{a1}}{h_{a1}}; \quad (9-21)$$

здесь λ_c — коэффициент теплопроводности стали сердечника; $\Lambda_{a\Delta 1}$ — тепловая проводимость зазора между сердечником статора и станиной,

$$\Lambda_{a\Delta 1} = \frac{\pi D_{a1} l_1}{\Lambda_{a1}} \lambda_i, \quad (9-22)$$

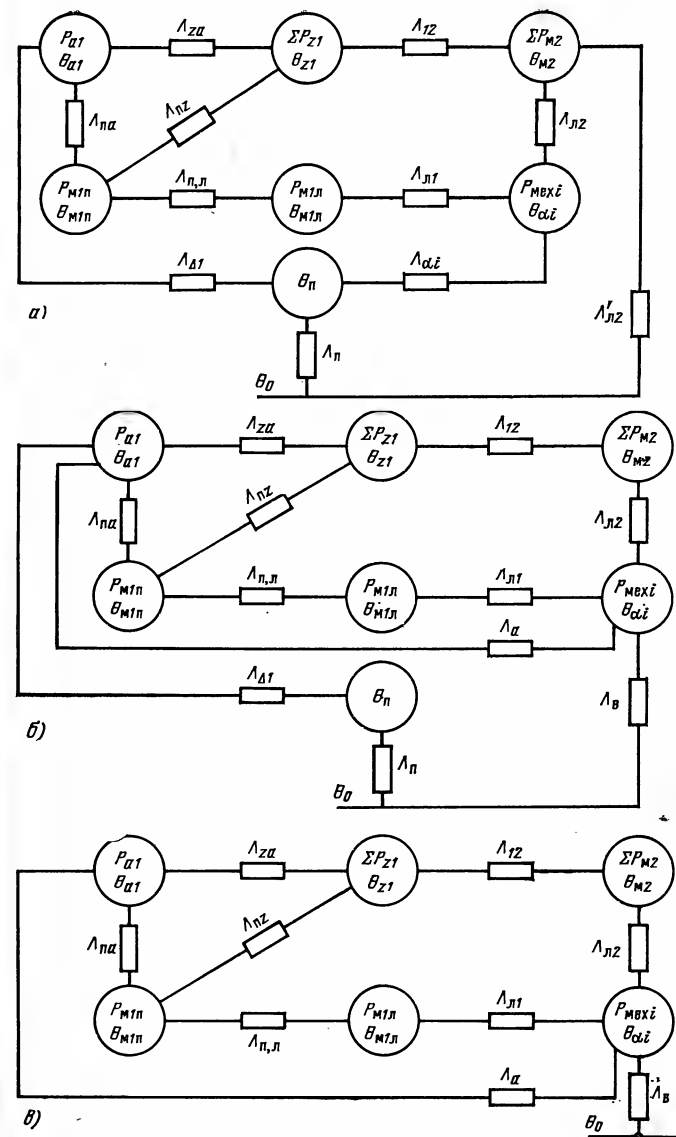


Рис. 9-2. Тепловые схемы замещения асинхронного двигателя.

а — исполнение по степени защиты IP44, способ охлаждения ICO141, форсированное охлаждение ротора; б — исполнение по степени защиты IP23(22), способ охлаждения ICO1, аксиальная система вентиляции; в — исполнение по степени защиты IP23(22), способ охлаждения ICO1, симметричная радиальная система вентиляции.

где λ_i — коэффициент теплопроводности воздуха или среды, заполняющей контактный зазор Δ_{a1} между сердечником и станиной; $\Delta_{a1} = (0,025 \div 0,03) \cdot 10^{-3}$ м для машин с $P_2 < 100$ кВт; $\Delta_{a1} = (0,05 \div 0,075) \cdot 10^{-3}$ м для машин с $P_2 > 100$ кВт;

$\Lambda_{ст}$ — тепловая проводимость станины,

$$\Lambda_{ст} = \pi (D_{a1} + \Delta_{ст}) l_1 \lambda_{ст} / \Delta_{ст}; \quad (9-23)$$

здесь $\Delta_{ст}$ — толщина станины; $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности материала станины.

2. Общая тепловая проводимость между статором и ротором

$$\Lambda_{12} = \Lambda_{\delta} \Lambda'_{z1} / (\Lambda_{\delta} + \Lambda'_{z1}), \quad (9-24)$$

где Λ_{δ} — тепловая проводимость воздушного зазора,

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\pi}{2} D_{i1} l_1 \alpha_{\delta}; \quad (9-25)$$

здесь α_{δ} — коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре; Λ'_{z1} — тепловая проводимость зубцов статора,

$$\Lambda'_{z1} = (2z_1 b_{z1} l_1 k_{c1} \lambda_c) / h_{z1}. \quad (9-26)$$

3. Общая тепловая проводимость между пазовой частью обмотки статора и зубцами

$$\Lambda_{пз} = \frac{1}{1/\Lambda'_{и,п1} + 1/\Lambda_{э,пз} + 1/\Lambda_{i1z} + 1/\Lambda_z}, \quad (9-27)$$

где $\Lambda'_{и,п1}$ — тепловая проводимость пазовой изоляции,

$$\Lambda'_{и,п1} = (2h_{z1} \lambda_{и,п1} l_1 z_1) / \Delta_{и,п1}; \quad (9-28)$$

здесь $\lambda_{и,п1}$ и $\Delta_{и,п1}$ — коэффициент теплопроводности и толщина пазовой изоляции; $\Lambda_{э,пз}$ — эквивалентная тепловая проводимость обмотки к зубцам,

$$\Lambda_{э,пз} = \frac{(d' + \Delta) \lambda_{э,пз} \cdot 2h_{z1} l_1 z_1}{(b_{п1} - 2\Delta_{и,п1})(\delta_{и,п1} + \Delta)}, \quad (9-29)$$

где Δ — воздушный зазор между проводами в пазах статора,

$$\Delta = d' [0,022 + 0,5 (1/\sqrt{k_3} - 1)]; \quad (9-30)$$

$\delta_{и,п1}$ — толщина изоляции провода; $\lambda_{э,пз}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки:

для всыпной обмотки [68]

$$\lambda_{э,пз} = 0,00165 (1 + 0,0007 \Theta_{м1}) [1 - 3,2d' (1 - 9,2k_{п1} + 5,2k_{п1}^2) + 81d'^2] (2,11k_3^{1,15} - 0,32) (\lambda_{п1}/0,00162)^{0,33} \times (\lambda_{э,м}/0,00143)^{0,25}; \quad (9-31a)$$

для жесткой обмотки

$$\lambda_{э,пз} = \frac{\delta_{и,п1} + \delta_{п1} + \delta'_{и,п1}}{\delta_{и,п1}/\lambda_{э,м} + \delta_{п1}/\lambda_{п1} + \delta'_{и,п1}/\lambda'_{и,п1}} \times \left(1 + \frac{m}{\delta_{и,п1} + \delta_{п1} + \delta'_{и,п1}}\right); \quad (9-31b)$$

здесь d' — диаметр провода; k_3 — коэффициент заполнения паза (2-20); $k_{п1}$ — коэффициент пропитки [68, 101]; $\Theta_{м1}$ — допускаемая температура обмотки статора для данного класса нагревостойкости системы изоляции; $\lambda_{п1} \lambda_{э,м}$ — коэффициент теплопроводности пропиточного лака и изоляции обмоточного провода; Λ_{i1z} — тепловая проводимость воздушного зазора между пазовой изоляцией и зубцами статора; $\delta_{п1}$ — толщина пропиточного лака между проводами; $\lambda'_{и,п1}$, $\delta_{и,п1}$ — коэффициент теплопроводности и толщина изоляционных прокладок; m — размер проводника в направлении теплового потока;

$$\Lambda_{i1z} = \frac{\lambda_i}{\delta_i} 2h_{z1} l_1 z_1; \quad (9-32)$$

здесь λ_i — коэффициент теплопроводности воздуха;

$$\delta_i = (0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Λ_z — проводимость зубца статора в направлении теплового потока от пазовой части обмотки,

$$\Lambda_z = b_{z1}/z_1 h_{z1} l_1 k_{c1} \lambda_c, \quad (9-33)$$

где b_{z1} — средняя ширина зубца статора.

4. Общая тепловая проводимость между пазовой частью обмотки и спинкой статора

$$\Lambda_{па} = \frac{1}{1/\Lambda''_{и,п1} + 1/\Lambda_{э,па} + 1/\Lambda_{i1a} + 1/\Lambda_a}, \quad (9-34)$$

где $\Lambda''_{и,п1}$ — тепловая проводимость пазовой изоляции,

$$\Lambda''_{и,п1} = b_{п1} \lambda_{и,п1} l_1 z_1 / \Delta_{и,п1}; \quad (9-35)$$

здесь $b_{п1}$ — средняя ширина паза; $\Lambda_{э,па}$ — эквивалентная тепловая проводимость обмотки к спинке,

$$\Lambda_{э,па} = \frac{(d' + \Delta) \lambda_{эк} b_{п1} l_1 z_1}{(h z_1 - 2 \Delta_{ип1}) (\delta_{и,пр} + \Delta)}; \quad (9-36)$$

Λ_{i1a} — тепловая проводимость воздушного зазора между пазовой изоляцией и спинкой статора,

$$\Lambda_{i1a} = \frac{\lambda_i}{\delta_i} b_{п1} l_1 z_1; \quad (9-37)$$

Λ_a — проводимость спинки статора в направлении теплового потока от пазовой части обмотки,

$$\Lambda_a = \frac{h_{a1}}{[0,5\pi (D_{a1} - h_{a1}) + b_{п1} z_1] l_1 k_{c1} \lambda_c}. \quad (9-38)$$

5. Проводимость между зубцом и спинкой статора

$$\Lambda_{za} = \frac{l_1 k_{c1} \lambda_c}{h_{z1}/2 z_1 b_{z1} + \frac{h_{a1}}{2\pi (D_{a1} - h_{a1})}}. \quad (9-39)$$

6. Тепловая проводимость между пазовой и лобовой частями обмотки статора

$$\Lambda_{п,л} = 12 \frac{\lambda_{м1} q_{м1} z_1}{l_1 + l_{л1}}, \quad (9-40)$$

где $q_{м1}$ — суммарное сечение проводников в пазу статора; $\lambda_{м1}$ — коэффициент теплопроводности материала обмотки статора.

7. Полная тепловая проводимость лобовой части обмотки статора к окружающей среде

$$\Lambda_{л1} = \frac{1}{1/\Lambda_{и,л1} + 1/\Lambda_{э,л1}}, \quad (9-41)$$

где $\Lambda_{и,л1}$ — тепловая проводимость изоляции,

$$\Lambda_{и,л1} = \frac{\lambda_{и,л1}}{\Delta_{и,л1}} 2 (h_{z1} + b_{п1}) l_{л1} z_1 k_{л1}; \quad (9-42)$$

здесь $\lambda_{и,л1}$ и $\Delta_{и,л1}$ — коэффициент теплопроводности и толщина изоляции лобовых частей; $k_{л1}$ — коэффициент обдува лобовых частей, учитывающий взаимное перекрытие катушек в лобовых частях; $k_{л1} = 0,4 \div 0,6$ для вращающихся обмоток; $k_{л1} = 0,6 \div 0,8$ для жестких обмоток;

$\Lambda_{э,л}$ — эквивалентная тепловая проводимость лобовой части,

$$\Lambda_{э,л} = (\Lambda_{э,л2} + \Lambda_{э,па}) \frac{l_{л1}}{l_1}; \quad (9-43)$$

$\Lambda_{э,л1}$ — тепловая проводимость поверхности лобовых частей,

$$\Lambda_{э,л1} = \alpha_{л1} \cdot 2 (h_{z1} + b_{п1}) l_{л1} z_1 k_{л1}, \quad (9-44)$$

где $\alpha_{л1}$ — средний коэффициент теплоотдачи с поверхности лобовых частей.

8. Общая тепловая проводимость лобовой части обмотки ротора к внутреннему воздуху

$$\Lambda_{л2} = \Lambda_{л,п2} \Lambda_{\alpha 2} / (\Lambda_{л,п2} + \Lambda_{\alpha 2}); \quad (9-45)$$

здесь $\Lambda_{л,п2}$ — тепловая проводимость между пазовой и лобовой частями клетки ротора,

$$\Lambda_{л,п2} = 12 \frac{\lambda_{м2} q_c z_2}{l_2 + b_k}, \quad (9-46)$$

где q_c — сечение стержня клетки ротора; $\lambda_{м2}$ — коэффициент теплопроводности материала обмотки; b_k — ширина короткозамыкающего кольца;

$$\Lambda_{\alpha 2} = \alpha_{л2} S_{л2}; \quad (9-47)$$

здесь $\alpha_{л2}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности лобовых частей обмотки ротора; $S_{л2}$ — поверхность двух лобовых частей (короткозамыкающих колец) обмотки ротора.

9. Общая тепловая проводимость внутреннего воздуха к оболочке двигателя

$$\Lambda_{\alpha i} = \Lambda_{\alpha ш} + \Lambda_{\alpha ст},$$

где $\Lambda_{\alpha ш}$ и $\Lambda_{\alpha ст}$ — тепловые проводимости внутреннего воздуха к подшипниковым щитам и станине,

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{\alpha ш} &= \alpha_{\alpha ш} S_{иш}; \\ \Lambda_{\alpha ст} &= \alpha_{\alpha ст} S_{ист}; \end{aligned} \right\} \quad (9-48)$$

здесь $\alpha_{\alpha ш}$ и $\alpha_{\alpha ст}$ — средние коэффициенты теплоотдачи с внутренней поверхности подшипниковых щитов и станины; $S_{иш}$ и $S_{ист}$ — площадь внутренней поверхности двух подшипниковых щитов и станины соответственно.

10. Тепловая проводимость оболочки двигателя к окружающей среде

$$\Lambda_{п} = \Lambda_{ст} + \Lambda_{ш},$$

где $\Lambda_{ст}$ — тепловая проводимость станины к охлаждающей среде,

$$\Lambda_{ст} = \alpha_{ст} \pi D_{ст} k_p k_{р,п}; \quad (9-49)$$

здесь $D_{ст}$ — наружный диаметр станины (без учета оребрения); $k_{p,т}$ — коэффициент оребрения станины с учетом внутреннего теплового сопротивления ребер;

$$k_{p,п} = \frac{1}{\rho_t h_p} \left[\text{th}(\rho h_p) \frac{2h_p}{t_p} \left(1 - \frac{\alpha_r}{\alpha_{с\sigma}} \right) + \rho_t h_p \Delta k_p \right], \quad (9-50)$$

где ρ_t — параметр теплоотдачи,

$$\rho_t = \sqrt{2\alpha_{ст}/\lambda_{ст} b_p}; \quad (9-51)$$

$\alpha_{ст}$ — коэффициент конвективной теплоотдачи станины; α_r — коэффициент теплоотдачи излучением; $\alpha_{с\sigma} = \alpha_{ст} + \alpha_r$ — суммарный коэффициент теплоотдачи станины; b_p — средняя толщина ребра; Δk_p — коэффициент, определяющий долю неоребранных участков от всей теплоотдающей поверхности,

$$\Delta k_p = n_p a_p / \pi D_{ст} k_p; \quad (9-52)$$

здесь n_p — число ребер станины; a_p — расстояние между ребрами; k_p — коэффициент оребрения станины,

$$k_p = h_p t_p / \pi D_{ст}, \quad (9-53)$$

где h_p — высота ребра; t_p — шаг оребрения; $\Lambda_{щ}$ — теплопроводность наружной поверхности щитов к охлаждающей среде,

$$\Lambda_{щ} = 0,5 (\alpha'_{щ} + \alpha''_{щ}) \pi D_{ст}^2; \quad (9-54)$$

здесь $\alpha'_{щ}$ и $\alpha''_{щ}$ — коэффициенты теплоотдачи с подшипниковых щитов со стороны вентилятора и стороны привода соответственно.

г) Коэффициенты теплоотдачи

1. Теплоотдача с поверхности лобовых частей обмотки статора

Поверхность, обращенная к станине:

$h = 71 \div 132$ мм, исполнение IP44,

$$Nu = 0,103 Re^{0,66}; 0,8 \cdot 10^3 \leq Re \leq 0,3 \cdot 10^4; \quad (9-55)$$

исполнение IP44, $h = 160 \div 250$ мм,

$$Nu = 0,056 Re^{0,65}; 0,15 \cdot 10^4 < Re < 0,1 \cdot 10^5; \quad (9-56)$$

исполнение IP23,

$$Nu = 0,095 Re^{0,62}; 0,14 \cdot 10^4 < Re < 0,87 \cdot 10^4. \quad (9-57)$$

Поверхность, обращенная к ротору:

$h = 71 \div 132$ мм, исполнение IP44,

$$Nu = 0,456 Re^{0,6}; 0,8 \cdot 10^3 \leq Re \leq 0,3 \cdot 10^4; \quad (9-58)$$

$h = 160 \div 250$ мм, исполнение IP44,

$$Nu = 0,069 Re^{0,77}; 0,15 \cdot 10^4 < Re < 0,1 \cdot 10^5; \quad (9-59)$$

исполнение IP23,

$$Nu = 0,069 Re^{0,77}; 0,14 \cdot 10^4 < Re < 0,87 \cdot 10^4. \quad (9-60)$$

Числа Нуссельта и Рейнольдса для формул (9-55) — (9-57) и (9-59), (9-60) равны:

$$Re = \omega_{л} d_{э\kappa} / \nu; Nu = \alpha_{л1} d_{э\kappa} / \lambda; \omega_{л} = 2,2 \cdot 10^{-2} n D_{л};$$

$$d_{э\kappa} = 4b_{л1} h_{z1} / 2(b_{л1} + h_{z1}),$$

где n — частота вращения; $D_{л}$ — наружный диаметр лопаток ротора.

Числа Нуссельта и Рейнольдса для формулы (9-58) равны:

$$Re = \omega_{л} b_{л} / \nu; Nu = \alpha_{л1} b_{л} / \lambda;$$

здесь $b_{л}$ — средняя ширина роторной лопатки.

2. Теплоотдача с поверхности лопаток ротора [104]

$$Nu = 0,747 Re^{0,5}; 0,2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 0,5 \cdot 10^5, \quad (9-61)$$

где

$$Re = \omega_p b_{л} / \nu; Nu = \alpha_{л2} b_{л} / \lambda; \omega_p = \pi D_{л} n / 60.$$

3. Теплоотдача в воздушном зазоре между статором и ротором [104]

$$Nu = 0,23 \beta \left(\frac{2\delta}{D_{ст}} \right)^{0,25} Re^{0,5}; 2 \cdot 10^2 \leq Re \leq 10^4; \quad (9-62)$$

здесь $Re = \omega_p \delta / \nu$; $Nu = \alpha_{\delta} \delta / \lambda$; β — коэффициент, учитывающий шероховатость поверхностей сердечников статора и ротора, $\beta = 1,15 \div 1,25$.

Средний коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности подшипниковых щитов

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{аш} &= 15 + 6,5 \omega_p^{0,7}; h = 71 \div 132 \text{ мм}; \\ \alpha_{аш} &= 3,89 \omega_p^{1,02}; h = 160 \div 250 \text{ мм}. \end{aligned} \right\} \quad (9-63)$$

Средний коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности станины

$$\alpha_{аст} = 4,58 \omega_p^{0,74}. \quad (9-64)$$

Теплоотдача с наружной поверхности оребренной станины

$$Nu = 0,66 Re^{0,756} (d_{э\kappa} / l_{ст})^{0,348}, \quad (9-65)$$

где $Re = v_{\text{ср}} d'_{\text{эк}} / \nu$; $Nu = \alpha_{\text{ст}} d'_{\text{эк}} / \lambda$; $d'_{\text{эк}} = 4b_p h_p / (2h_p + b_p)$; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость воздуха в межреберных каналах (см. § 8-4); l_x — расстояние от начала ребра (со стороны вентилятора) до точки x — места определения коэффициента теплоотдачи; $d'_{\text{эк}}$ — гидравлический диаметр межреберного канала.

Коэффициент теплоотдачи излучением α_r — определяется по закону Стефана — Больцмана

$$\alpha_r = \frac{\epsilon c_0}{T_{\text{ст}} - T_0} \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right],$$

где ϵ — относительная излучательная способность; c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{ст}}$, T_0 — абсолютные температуры станины и окружающего воздуха, К.

В зависимости от класса нагревостойкости системы изоляции могут быть приняты следующие значения коэффициента теплоотдачи:

Класс нагревостойкости	В	Ф	Н
α_r , Вт/(м ² ·°С)	6,3	6,8	7,5

Средний коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности подшипниковых щитов [68]:
со стороны вентилятора

$$\alpha'_{\text{щ}} = 20 + 14,3 (0,5u_2)^{0,6}; \quad (9-66)$$

со стороны привода

$$\alpha''_{\text{щ}} = 20 + 2,6 (0,5u_2)^{0,9}, \quad (9-67)$$

где u_2 — окружная скорость на наружном диаметре вентилятора.

Теплоотдача в канале между спинкой статора и станиной для двигателей со степенью защиты IP23 [68]

$$Nu = 0,57 Re^{0,5} \epsilon_l \text{ при } 0,4 \cdot 10^4 \leq Re \leq 0,9 \cdot 10^4 \quad (9-68)$$

и

$$Nu = 0,0289 Re^{0,78} \epsilon_l \text{ при } 0,9 \cdot 10^4 < Re \leq 0,25 \cdot 10^5. \quad (9-69)$$

В (9-68), (9-69) принято: ϵ_l — коэффициент, учитывающий начальную турбулентность потока;

$$Re = w_k \cdot 2h_k / \nu; \quad Nu = \alpha_k \cdot 2h_k / \lambda;$$

здесь h_k — высота канала.

д) Коэффициенты теплопроводности

Значения коэффициентов теплопроводности электрических и конструкционных материалов, применяемых в современных асинхронных двигателях, приведены в табл. 9-1—9-5.

Таблица 9-1

Наименование проводникового материала	λ_m , Вт/(м·°С)
Медь чистая (М00)	392
Алюминий чистый (А7)	190
Сплав АК10	120
Сплав АКМ12-4	100
Сплав АКЦ-11-12	80

Таблица 9-2

Наименование изоляционного материала	λ_n , Вт/(м·°С)
Пленка полиэтилентерефталатная (ПЭТФ)	0,11—0,13
Пленка полиимидная (ПИ-1)	0,15—0,17
Электрокартон (ЭВ)	0,174—0,187
Пленкоэлектрокартон (на полиэтилентерефталатной пленке)	0,192
Пленкоасбокартон (на полиэтилентерефталатной пленке)	0,183
Миканит гибкий	0,31—0,41
Стекломиканит	0,158
Микафолит	0,17—0,19
Стеклолакоткань (ЛСЭ, ЛСБ, ЛСК)	0,18—0,2
Пленколакослюдопласт (ГИП, ЛСП, ПЛ)	0,167
Лакотканеслюдопласт (ГИТ, ЛСБ, ЛСА)	0,197—0,216
Композиционный материал:	
стеклолакоткань и полиэтилентерефталатная пленка («Изофлекс 2»)	0,162
бумага «фенилон» и полиэтилентерефталатная пленка (пленкосинтокартон Г)	0,14
бумага полиэфирная и полиэтилентерефталатная пленка (пленкосинтокартон В, тривольтерм Р)	0,096
бумага «номекс» и полиэтилентерефталатная пленка (тривольтерм N)	0,124
Стеклотекстолит	0,19—0,32

Таблица 9-3

Марка стали	$\lambda_c, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	Марка стали	$\lambda_c, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$
1211, 1212, 1213	38,5—35,6	2011	40,7
1312	23,8	2013	55,6
1411, 1412	21—20	3413	52,8

Таблица 9-4

Наименование пропиточного состава	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$
Лак бакелитовый	0,29
Лак МГМ-8	0,27
Лак ПЭ-933	0,143
Лак КП-103	0,41
Лак кремнийорганический	0,186

Таблица 9-5

Наименование конструкционного материала	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	Наименование конструкционного материала	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$
Чугун СЧ14-32	50,6	Нержавеющая сталь 2Х13	25,5
Сталь 3	67,7	Латунь ЛАН-3-2	96,5
Сталь 10	57,7	Силумин	150
Сталь марки 20	51	Бронза оловянистая	64
Сталь марки 45	48,1	Дюралюминий	160

9-4. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

а) Математическое описание процессов нагрева двигателя

Температурное поле i -го элемента асинхронного двигателя, работающего в нестационарном режиме, описывается дифференциальным уравнением теплопроводности вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ix} \frac{\partial \Theta_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{iy} \frac{\partial \Theta_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{iz} \frac{\partial \Theta_i}{\partial z} \right) + q_i(t, x, y, z) = c_i \rho_i \frac{\partial \Theta_i}{\partial t}, \quad (9-70)$$

где c_i — удельная теплоемкость материала i -го элемента; ρ_i — плотность материала i -го элемента.

Для обеспечения единственности решения дифференциального уравнения (9-70) задаются начальными и граничными условиями. Начальные условия задают закон распределения температур внутри элемента в начальный момент времени:

$$\Theta_{i,t=0} = \psi(x, y, z). \quad (9-71)$$

Граничные условия в нестационарном режиме:

$$\Theta_{ir} = f(t, x, y, z); \quad (9-72)$$

$$\left(\frac{\partial \Theta_i}{\partial n} \right)_r = \varphi(t, x, y, z); \quad (9-73)$$

$$\left(\frac{\partial \Theta_i}{\partial n} \right)_r = - \frac{\alpha_i}{\lambda_{in}} [\Theta_{ir}(t) - \Theta_{oi}(t)]; \quad (9-74)$$

$$\lambda_{in} \left(\frac{\partial \Theta_i}{\partial n} \right)_r = \lambda_{(i-1)n} \left(\frac{\partial \Theta_{i-1}}{\partial n} \right)_r. \quad (9-75)$$

Точное решение уравнения (9-70) в трехмерном анизотропном пространстве не представляется возможным. Однако в практике тепловых расчетов решение в столь общей постановке и не требуется. Практический интерес представляют задачи, поставленные с учетом оправданных упрощений, которые диктуются особенностями конструкции и режима работы каждого типа двигателя.

В практике обычно пользуются средними значениями температур. В этом случае элементы асинхронного двигателя заменяют условными однородными телами с сосредоточенными источниками теплоты, без внутренних перепадов температуры, взаимосвязанными в тепловом отношении. Тепловые процессы в такой системе тел описываются системой дифференциальных уравнений вида

$$c_i \rho_i \frac{d\Theta_i}{dt} + \sum_{j=1}^n \Lambda_{ij} (\Theta_i - \Theta_j) = q_i. \quad (9-76)$$

Для расчета нагрева элементов асинхронного двигателя может быть использован описанный метод ЭТС.

б) Расчет нагрева обмоток при пуске

При пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 90—95% всех потерь выделяется в обмотках за небольшой промежуток времени. Выделяющаяся теплота идет в основном на увеличение теплосодержания обмоток и частично передается сердечникам стато-

ра и ротора, а также воздуху внутри машины. В таких условиях есть все основания рассматривать нагрев статора и ротора отдельно без учета их взаимного влияния.

Расчет нагрева обмотки статора

В связи с преобладающим действием тепловыделения над теплопередачей при небольшой продолжительности переходного процесса можно считать процесс нагрева обмотки статора адиабатическим, по крайней мере при продолжительности пуска до 10 с. В этом случае превышение температуры обмотки статора в конце пуска

$$\Delta\Theta_{M1} = W_{M1}/c_{M1} m_{M1}, \quad (9-77)$$

где W_{M1} — потери энергии в обмотке статора, за время пуска определяются по (6-43); m_{M1} — масса обмотки статора; c_{M1} — удельная теплоемкость материала обмотки статора.

При времени пуска более 10 с необходимо учитывать теплопередачу от обмотки статора к сердечнику и к внутреннему воздуху. При этом температуру сердечника можно считать неизменной. Коэффициент теплоотдачи с поверхности лобовых частей зависит от частоты вращения двигателя, поэтому нагрев обмотки статора за время пуска можно рассчитать для двух граничных случаев: при неподвижном роторе; при номинальной частоте вращения ротора. Тогда истинная температура обмотки в конце пуска будет находиться между этими двумя граничными значениями. Расчет проводится по методу ЭТС, как это показано в § 9-3.

Расчет нагрева обмотки ротора

Процесс нагрева изолированной обмотки ротора принципиально не отличается от нагрева обмотки статора. Однако при нагреве короткозамкнутого ротора с неизолированной клеткой теплоотдача к сердечнику ротора имеет уже существенное значение даже при относительно небольшой продолжительности пуска.

При пренебрежении теплоотдачей к внутреннему воздуху и потерями в сердечнике уравнения теплового баланса ротора имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} C_{M2} \frac{d\Theta_{M2}}{dt} + \Lambda_{M,c} (\Theta_{M2} - \Theta_{C2}) &= P_{M2}(t); \\ C_{C2} \frac{d\Theta_{C2}}{dt} - \Lambda_{M,c} (\Theta_{M2} - \Theta_{C2}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9-78)$$

где Θ_{M2} и Θ_{C2} — температура обмотки и сердечника ротора соответственно; C_{M2} и C_{C2} — теплоемкость обмотки и сердечника ротора; $P_{M2}(t)$ — зависимость потерь в обмотке ротора от времени в процессе пуска; $\Lambda_{M,c}$ — тепловая проводимость между обмоткой и сердечником ротора.

Обозначив $\Theta_2 = \Theta_{M2} - \Theta_{C2}$, систему (9-78) преобразуем:

$$\frac{d\Theta_2}{dt} + \Lambda_{M,c} \frac{C_{M2} + C_{C2}}{C_{M2} C_{C2}} \Theta_2 = \frac{P_{M2}(t)}{C_{M2}}. \quad (9-79)$$

Решением уравнения (9-79) при начальном условии $t=0, \Theta_2=\Theta_{20}$ является выражение

$$\Theta_2 = e^{-t/T_p} \left(\frac{1}{C_{M2}} \int_0^{t_p} P_{M2}(t) e^{t/T_p} dt + \Theta_{20} \right), \quad (9-80)$$

где $T_p = C_{M2} C_{C2} / \Lambda_{M,c} (C_{M2} + C_{C2})$ — постоянная времени нагрева; t_p — продолжительность пуска.

Методы определения $t_p, P_{M2}(t)$ приведены в гл. 6. Расчетное определение постоянной времени T_p затруднительно, так как теплопередача от стержней клетки к сердечнику ротора в значительной степени зависит от технологии изготовления обмотки ротора и, кроме того, не является постоянной в процессе пуска из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения материала клетки и стали. Значение T_p может быть определено экспериментально из зависимости от времени разности температур между клеткой и сердечником, полученной при охлаждении ротора в неподвижном состоянии.

Превышение температуры стержней ротора при пуске $\Delta\Theta_{M2c}$ может быть ориентировочно оценено по формуле [93]

$$\Delta\Theta_{M2c} = \Delta\Theta_{M2cy} (1 - e^{-t_p/T_c}), \quad (9-81)$$

где $\Delta\Theta_{M2cy}$ — установившееся значение превышения температуры стержней;

$$\Delta\Theta_{M2c} = P_{M2c} / \alpha S_c; \quad (9-82)$$

здесь $P_{M2c} = 0,7 W_{M2}/t_p$ — средние за пуск потери мощности в стержнях ротора; W_{M2} — потери энергии в обмотке ротора за время пуска (см. гл. 6); $S_c = z_2 l_2$ —

поверхность охлаждения всех стержней; P_c — периметр сечения стержня ротора; T_c — постоянная времени нагрева стержней,

$$T_c = c_c q_c \rho_c / \alpha P_c, \quad (9-83)$$

где c_c , ρ_c — удельная теплоемкость и плотность материала стержней; q_c — сечение стержня; $\alpha \approx 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Часто процесс пуска протекает достаточно быстро, не превышая даже 1 с. В этом случае процесс нагрева ротора можно считать адиабатическим и определять превышение температуры клетки аналогично определению превышения температуры обмотки статора (9-77) с подстановкой потерь энергии в обмотке ротора $W_{м2}$, удельной теплоемкости и массы клетки ротора.

в) Расчет нагрева двигателя при кратковременных режимах

В соответствии с ГОСТ 183-74 кратковременный режим характеризуется работой машины при неизменной внешней нагрузке с определенной продолжительностью, при которой температура отдельных частей двигателя не достигает своего установившегося значения, после чего следует отключение от сети, продолжительность которого достаточна для охлаждения частей двигателя до температуры окружающей среды. ГОСТ 183-74 устанавливает длительность периода неизменной номинальной нагрузки 10; 30; 60 и 90 мин. Возможны и другие продолжительности работы (указываются в технических условиях на отдельные типы двигателей).

Характер нагревания двигателя при кратковременных режимах определяется кривыми его нагревания при постоянной нагрузке, а характер охлаждения при паузе — кривыми охлаждения.

Кривые нагревания асинхронного двигателя при постоянной нагрузке

Наиболее простым с точки зрения расчетов является процесс нагревания однородного тела бесконечной теплопроводности при неизменной температуре окружающей среды и неизменном коэффициенте теплоотдачи с поверхности тела. Этот процесс описывается линейным дифференциальным уравнением, являющимся выражением теплового баланса между тепловой энергией, выде-

ляющейся в теле за время dt , а также энергией, идущей на повышение теплосодержания тела, и энергией, отводимой в окружающую среду:

$$P dt = C d\Delta\Theta + \Lambda \Delta\Theta dt. \quad (9-84)$$

Решением уравнения (9-79) при начальном условии $t=0$, $\Delta\Theta=0$ имеет вид:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_y (1 - e^{-t/T}), \quad (9-85)$$

где $\Delta\Theta_y = P/\Lambda$ — установившееся повышение температуры; $T = C/\Lambda$ — постоянная времени нагрева.

Расчет кривой нагрева асинхронного двигателя и особенно двигателя со степенью защиты IP44 можно свести к расчету нагрева однородного тела. Установившееся значение превышения температуры элемента двигателя определяется как отношение суммы теплоемкостей отдельных однородных частей двигателя к тепловой проводимости от оболочки в окружающую среду. Однако такое определение постоянной времени может привести к значительным погрешностям в расчете кривой нагрева, так как температурное поле внутри двигателя крайне неравномерно.

Ошибку в определении постоянной времени нагрева можно уменьшить, если использовать теорию регулярного теплового режима [98], который наступает спустя некоторое время после включения двигателя и характеризуется тем, что начальные условия начинают играть второстепенную роль, и процесс нагрева полностью определяется только условиями охлаждения на границе тела и среды, физическими свойствами тела, его геометрической формой и размерами. В этом случае температурное поле двигателя описывается одной экспонентой с основной (наибольшей) постоянной времени

$$T = \frac{1}{\Psi} \frac{C}{\Lambda}, \quad (9-86)$$

где Ψ — коэффициент неравномерности температурного поля.

Коэффициент Ψ может быть рассчитан для стационарного режима нагрева (§ 9-3) как отношение среднего превышения температуры оболочки к среднему пре-

вышению температуры по объему двигателя. При этом среднее превышение температуры по объему равно:

$$\Delta\theta_v = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i V_i / \sum_{i=1}^n V_i, \quad (9-87)$$

где n — число тел в тепловой схеме замещения; V_i — объем i -го тела.

Таким образом, расчет кривой нагрева двигателя по (9-85) с использованием основной постоянной времени

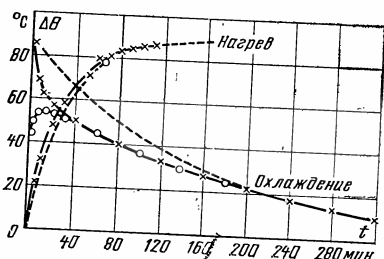


Рис. 9-3. Кривые нагрева и охлаждения двигателя 4АС180М4 при мощности 25 кВт.

Х—Х— обмотка статора; О—О— станина, — — — аппроксимация одной экспонентой.

альных уравнений вида (9-76). Исходя из физической картины протекания тепловых процессов в асинхронном двигателе, наиболее правильным было бы выбрать эквивалентную тепловую схему, состоящую из четырех тел: обмотки статора, сердечника статора (вместе со станиной), обмотки ротора, сердечника ротора. Однако из-за громоздкости решения системы из четырех дифференциальных уравнений часто обмотку и сердечник ротора объединяют в одно тело.

Следует отметить, что для серий асинхронных двигателей А и АО в [99] были получены эмпирические формулы для расчета эквивалентной постоянной времени с учетом минимального отклонения расчетной кривой нагрева от опытной. Однако эти формулы справедливы только для машин, имеющих геометрическое, гидродинамическое и тепловое подобие.

Кривые охлаждения асинхронного двигателя

Кривые охлаждения однородного тела бесконечной теплопроводности рассчитываются аналогично кривым нагревания, но при отсутствии внутренних источников теплоты:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{(0)} e^{-t/T}, \quad (9-88)$$

где $\Delta\theta_0$ — начальное превышение температуры.

При $\Delta\theta_0 = \Delta\theta_y$ и равенстве постоянных времени нагрева и охлаждения зависимости (9-85) и (9-88) являются зеркально симметричными. Однако это возможно лишь в том случае, если охлаждение происходит при тех же условиях, что и нагрев. В действительности чаще всего постоянные времени нагрева и охлаждения различны, так как охлаждение обычно происходит при остановленном двигателе.

При рассмотрении двигателя как системы n тел кривая охлаждения аппроксимируется суммой экспонент:

$$\Delta\theta = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_{i0} e^{-t/T_i}. \quad (9-89)$$

Как правило, охлаждение остановленного двигателя происходит при малых значениях числа Био. Рассмотрим процесс охлаждения двигателя со степенью защиты IP44. В начальной стадии идет довольно быстрое перераспределение теплоты в статоре и роторе за счет теплопроводности (рис. 9-3). В дальнейшем процесс охлаждения определяется тепловым взаимодействием статора и ротора, которые можно рассматривать как два однородных тела бесконечной теплопроводности, разделенных воздушным зазором. Пренебрегая теплоемкостью воздушного зазора и считая температуру окружающей среды равной нулю, тепловой баланс такой системы тел можно описать уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \Lambda_n \theta_1 - \Lambda_{21} (\theta_2 - \theta_1) &= 0; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \Lambda_{21} (\theta_2 - \theta_1) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9-90)$$

где индекс 1 обозначает параметры статора, индекс 2 — ротора.

Решив систему (9-90) при $\Theta_1(0) = \Theta_{1y}$ и $\Theta_2(0) = \Theta_{2y}$, получим:

$$\Theta_1 = \Theta_{2y} \frac{\Lambda_{21} T_1 T_2}{C_2 (T_2 - T_1)} a_1 e^{-t/T_2} \left(1 - \frac{C_2}{\Lambda_{21} T_2} \right) \times \\ \times \left[1 - \frac{a_2 \left(1 - \frac{C_2}{\Lambda_{21} T_1} \right)}{a_1 \left(1 - \frac{C_2}{\Lambda_{21} T_2} \right)} e^{-(1/T_1 - 1/T_2)t} \right]; \quad (9-91)$$

$$\Theta_2 = \Theta_{2y} \frac{\Lambda_{21} T_1 T_2}{C_2 (T_2 - T_1)} a_1 e^{-t/T_2} \left[1 - \frac{a_2}{a_1} e^{-(1/T_1 - 1/T_2)t} \right]; \quad (9-92)$$

$$a_1 = \Theta_{1y}/\Theta_{2y} + C_2/\Lambda_{21} T_1 - 1; \quad (9-93)$$

$$a_2 = \Theta_{1y}/\Theta_{2y} + C_2/\Lambda_{21} T_2 - 1; \quad (9-94)$$

$$\frac{1}{T_{12}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Lambda_{11}}{C_1} + \frac{\Lambda_{21}}{C_2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \right] \pm \\ \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{\Lambda_{11}}{C_1} + \frac{\Lambda_{21}}{C_2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \right]^2 - \frac{\Lambda_{11} \Lambda_{21}}{C_1 C_2}}. \quad (9-95)$$

При равенстве нулю второго слагаемого в квадратных скобках выражения (9-91) возникает регулярный режим охлаждения. Практически можно считать регулярным режим наступившим при условии

$$\frac{a_2 (1 - C_2/\Lambda_{21} T_1)}{a_1 (1 - C_2/\Lambda_{21} T_2)} e^{-(1/T_1 - 1/T_2) t_p} \leq 0,05.$$

При этом все элементы двигателя охлаждаются по экспоненциальному закону с основной постоянной времени T_2 .

Полное охлаждение машины до температуры окружающей среды теоретически наступает при $t = \infty$. Однако можно считать практически двигатель остывшим при $\Theta_2/\Theta_{2y} = \delta$. Тогда из (9-91) время до полного охлаждения двигателя

$$t_{охл} = T_2 \ln \frac{\left[\frac{\Theta_{2y}}{\Theta_{1y}} \frac{\Lambda_{21} T_2 T_1}{C_2 (T_2 - T_1)} a_2 \left(1 - \frac{C_2}{\Lambda_{21} T_2} \right) \right]}{\delta}. \quad (9-96)$$

С достаточной точностью можно принять $\delta = 0,01$.

г) Расчет нагрева двигателя при повторно-кратковременных режимах

Под повторно-кратковременным режимом работы понимается такой режим, при котором кратковременные периоды работы двигателя с неизменной внешней нагрузкой (рабочим периодами) чередуются с периодами отключения машины (паузами). Причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы температура отдельных частей двигателя могла достигнуть установившегося значения. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ), выражаемой в процентах и представляющей отношение продолжительности рабочего периода к продолжительности полного цикла. ГОСТ 183-74 устанавливает продолжительности включения ПВ-15; 25; 40 и 60%; продолжительность цикла, если нет других указаний, равна 10 мин.

При рассмотрении двигателя как однородного тела бесконечной теплопроводности кривая нагрева при повторно-кратковременной нагрузке может быть получена из кривой нагрева при постоянной нагрузке и кривой охлаждения. Принимая $\Theta_0 = 0$ для квазиустановившегося состояния согласно (9-85) и (9-88), имеем:

$$\Theta_{max} = \Theta_y (1 - e^{-t_p/T_p}) + \Theta_{min} e^{-t_p/T_p}; \quad (9-97) \\ \Theta_{min} = \Theta_{max} e^{-t_0/T_0},$$

где t_p — продолжительность рабочего периода; t_0 — продолжительность паузы. Решив систему (9-97), получим максимальную и минимальную температуры двигателя в цикле:

$$\Theta_{max} = \Theta_y \frac{e^{t_p/T_p} - 1}{e^{t_p/T_p} - e^{-t_0/T_p}}; \quad (9-98)$$

$$\Theta_{min} = \Theta_y \frac{e^{t_p/T_p} - 1}{e^{t_p/T_p} - e^{-t_0/T_p}} e^{-t_0/T_0}. \quad (9-99)$$

Однако выше были показаны недостатки аппроксимации кривой нагрева двигателя одной экспонентой. Кроме того, нагрев обмотки статора и станины двигателя в повторно-кратковременном режиме происходит в противофазе (рис. 9-4), поэтому рассмотрение двигателя как однородного тела в этом случае физически неправильно.

Приближенно среднее значение превышения температуры обмотки статора при повторно-кратковременном режиме и квазиустановившемся состоянии можно определить по методу эквивалентных греющих потерь [90]. Для этого рассчитывается превышение температуры обмотки статора $\Delta\Theta_{м1}$ в стационарном режиме только от потерь $P_{м1}$ (все другие потери в двигателе

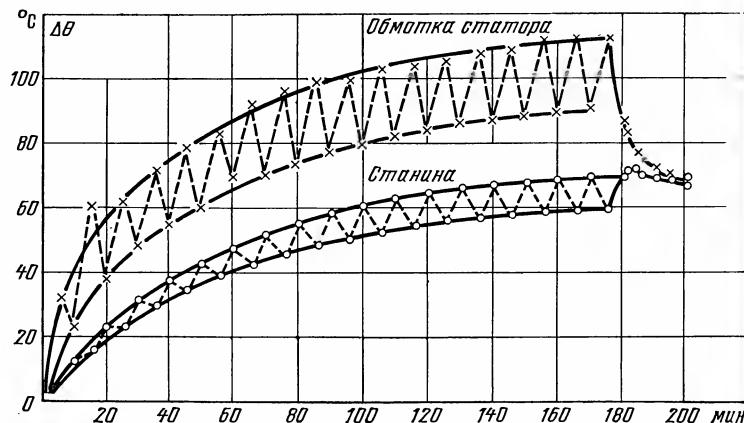


Рис. 9-4. Кривые нагрева двигателя 4АС180М4 мощностью 28,5 кВт в повторно-кратковременном режиме при ПВ-60%.

приравняются нулю). Тогда общее тепловое сопротивление обмотки статора

$$R = \Delta\Theta_{м1}/P_{м1}. \quad (9-100)$$

Тепловое сопротивление при повторно-кратковременном режиме

$$R_{\epsilon} = R/[\epsilon + \beta(1 - \epsilon)], \quad (9-101)$$

где $\beta = \alpha_0/\alpha_{ст\Sigma}$ — коэффициент ухудшения охлаждения при паузе; α_0 — коэффициент теплоотдачи при неподвижном роторе.

С достаточной для практики точностью можно принять $\alpha_0 = 16,7$ Вт/(м²·°С); ϵ — продолжительность включения двигателя.

Эквивалентные греющие потери определяются из расчета превышения температуры обмотки статора $\Delta\Theta_{м1}$ в стационарном режиме от потерь в рабочем периоде повторно-кратковременного режима:

$$P_{\epsilon} = \Delta\Theta_{м1}/R. \quad (9-102)$$

Тогда повышение температуры обмотки статора в повторно-кратковременном режиме

$$\Delta\Theta_{\Sigma} = \epsilon P_{\epsilon} R_{\epsilon}. \quad (9-103)$$

Для более точного расчета нагрева двигателей в повторно-кратковременных режимах необходимо решить системы уравнений (9-76) для рабочего периода и для паузы.

Глава десятая

РАСЧЕТЫ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ И МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

При проектировании асинхронных двигателей наряду с электромагнитными, тепловыми, вентиляционными существенное место занимают размерные и механические расчеты. Правильно проведенный размерный расчет во многом определяет компактность машины, технологический процесс ее изготовления и сборки. От того, насколько правильно выполнен механический расчет, зависят расход конструктивных материалов и необходимые запасы прочности деталей и двигателя в целом. А это в значительной мере определяет экономичность двигателя и надежность его в эксплуатации.

10-1. РАСЧЕТЫ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

а) Назначение и основные методы

Расчет размерных цепей представляет собой геометрический расчет двигателя; расчет устанавливает допустимые значения ошибок взаимного положения деталей, не нарушающие работоспособность двигателя [108].

Размерной цепью называют совокупность размеров, образующих замкнутый контур и непосредственно участвующих в решении поставленной задачи, т. е. в определении размеров исходного (замыкающего) звена размерной цепи (ГОСТ 16319-70). Обычно исходным (замыкающим) звеном размерной цепи является расстояние или относительный поворот поверхностей деталей, взаимное положение которых требуется определить при проектировании двигателя.

Цель расчета размерной цепи — нахождение номинальных размеров и предельных отклонений всех составляющих размерную цепь звеньев исходя из установленных требований к исходному звену. Такая постановка вопроса называется прямой задачей. При проектировании серий асинхронных двигателей чаще приходится проводить поверочный расчет размерной цепи, т. е. решать обратную задачу. При этом определяют номинальный размер и предельные отклонения замыкающего звена при известных номинальных размерах и предельных отклонениях составляющих звеньев размерной цепи. Предельные отклонения номинальных размеров составляющих звеньев устанавливаются исходя из принятых или намечаемых к применению технологических процессов, вида используемого оборудования, а также использования имеющегося опыта проектирования и производства аналогичных двигателей.

Расчет размерных цепей может проводиться двумя методами: методом максимума—минимума, учитывающим только предельные отклонения составляющих звеньев, либо вероятностным методом, учитывающим явление рассеяния и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев.

Выбор метода расчета размерной цепи определяется характером производства двигателей, экономически целесообразной точностью изготовления, а также техническими возможностями достижения на практике необходимой точности составляющих звеньев размерной цепи.

В изделиях (узлах), где должна быть обеспечена 100%-ная взаимозаменяемость деталей, расчет размерной цепи, как правило, ведется по методу максимума—минимума.

б) Размерные цепи асинхронного двигателя

В асинхронном двигателе размерные цепи могут рассматриваться как в плоскости, проходящей через его продольную ось, так и в плоскости, перпендикулярной продольной оси.

При проектировании двигателей общего назначения, предназначенных к крупносерийному и массовому производству, проводится поверочный расчет размерных

цепей для определения следующих замыкающих звеньев в плоскостях, проходящих через продольную ось двигателя:

расстояние от торца упорного буртика подшипниковой крышки до торца наружной обоймы подшипника в фиксирующей и плавающей опорах двигателя;

расстояние от лобовой части обмотки до ближайшей точки станины (щита) двигателя;

расстояние от наиболее выступающей в осевом направлении вращающейся части (ротора) до ближайшей неподвижной части (подшипниковой крышки, щита);

расстояние от вентилятора наружного обдува до ближайшей части подшипникового щита и кожуха вентилятора;

расстояние от заплечика выступающего конца вала до оси ближайшего отверстия в лапе (l_{31} по ГОСТ 4541-70);

расстояние от заплечика выступающего конца вала до опорного торца крепительного фланца (l_{39} по ГОСТ 4541-70);

в плоскостях, перпендикулярных продольной оси двигателя;

воздушный зазор;

неравномерность воздушного зазора;

торцевое биение опорного фланца;

непараллельности оси вращения вала относительно опорной плоскости лап;

радиальное биение заточки крепительного фланца относительно оси вращения вала;

радиальное биение выступающего конца вала относительно оси вращения.

Перечисленные размерные цепи являются определяющими, а расчет их — достаточным для характеристики геометрических размеров двигателя.

Ниже в качестве примера приведены расчеты некоторых размерных цепей двигателя серии 4А с высотой оси вращения 180 мм (рис. 10-1). Замыкающие звенья цепей А, Б и В имеют довольно свободные предельные отклонения, и вместе с тем составляющие звенья должны обеспечивать 100%-ную взаимозаменяемость, поэтому расчет их ведется по методу максимума—минимума.

В цепях А, Б и В имеются общие звенья — B_2B_2 , B_3 , $A_5B_4B_4$, B_5B_5 и т. д., т. е. цепи А, Б и В являются параллельно связанными.

Расчет замыкающих звеньев для цепей А, Б и В проводится по ГОСТ 16320-70.

Номинальный размер замыкающего звена

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i A_i. \quad (10-1)$$

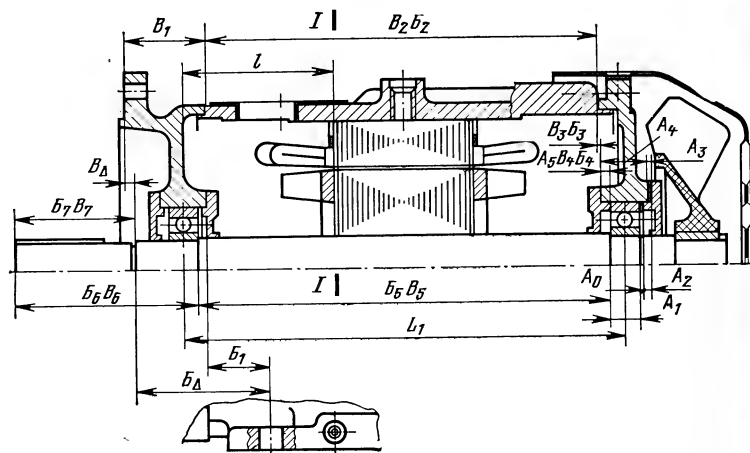


Рис. 10-1. Размерные цепи асинхронного двигателя.

Поле допуска замыкающего звена

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \delta_i. \quad (10-2)$$

Координата середины поля допуска замыкающего звена

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i}. \quad (10-3)$$

Верхнее предельное отклонение замыкающего звена

$$\Delta_{в\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i} + \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \frac{\delta_i}{2}. \quad (10-4)$$

Нижнее предельное отклонение замыкающего звена

$$\Delta_{н\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i} - \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \frac{\delta_i}{2}. \quad (10-5)$$

В приведенных формулах ξ_i — передаточное отношение. Для цепей с параллельными звеньями $\xi_i = +1$ для увеличивающих составляющих звеньев и $\xi_i = -1$ для уменьшающих.

В общем случае

$$\xi_i = \partial A_{\Delta} / \partial A_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ — порядковый номер звена.

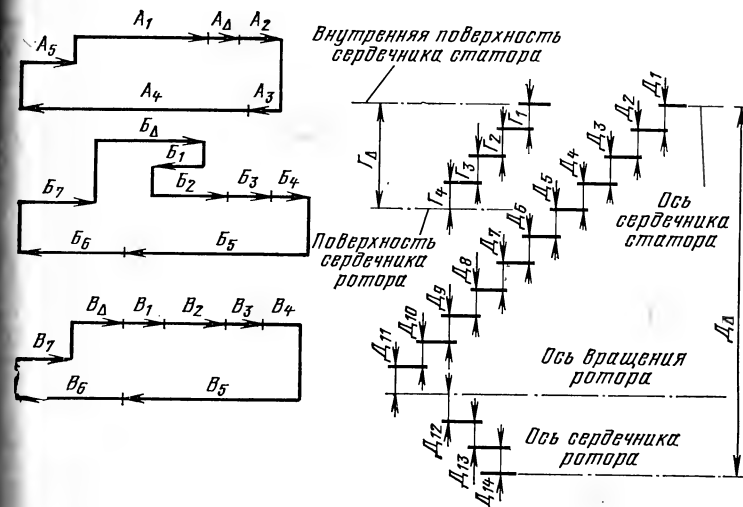


Рис. 10-2. Схемы размерных цепей.

Координата середины поля допуска составляющего звена

$$\Delta_{0i} = (\Delta_{vi} + \Delta_{ni})/2. \quad (10-6)$$

Поле допуска составляющего звена

$$\delta_i = \Delta_{vi} - \Delta_{ni}. \quad (10-7)$$

На рис. 10-2 представлены схемы цепей А, Б, В, а в табл. 10-1—10-3 результаты расчета замыкающих звеньев A_{Δ} , B_{Δ} , C_{Δ} .

Замыкающие звенья цепей Г и Д (рис. 10-2) рассчитаны по вероятностному методу. Обусловлено это тем, что предельные отклонения замыкающих звеньев этих цепей (величина и неравномерность воздушного зазора) не могут быть установлены достаточно свободными в

Таблица 10-1

Обозначение звена	Передаточное отношение ξ_i	Наименование звена размерной цепи	Параметры звена размерной цепи, мм				
			A_i	Δ_B	Δ_H	δ_i	Δ_{0i}
A_1	-1	Расстояние от внутреннего торца внутреннего кольца подшипника до наружного торца наружного кольца подшипника	31	0	-0,15	0,15	-0,075
A_2	-1	Размер упорного буртика наружной подшипниковой крышки	4,5	0	-0,08	0,08	-0,04
A_3	+1	Размер дистанционной прокладки подшипниковой крышки	1,5	+0,2	0	0,2	+0,1
A_4	+1	Размер ступицы подшипникового шпindelа	40	0	-0,17	0,17	-0,085
A_5	-1	Размер упорного буртика внутренней подшипниковой крышки	4,5	0	-0,08	0,08	-0,04
A_{Δ}	-	Расстояние от торца упорного буртика подшипниковой крышки до торца наружной обоймы подшипника	1,5	+0,51	-0,17	0,68	+0,17

Обозначение звена	Передаточное отношение ξ_i	Наименование звена размерной цепи	Параметры звена размерной цепи, мм				
			B_i	Δ_B	Δ_H	δ_i	Δ_{0i}
B_1	+1	Расстояние от оси ближайшего отверстия в лапе со стороны выступающего конца вала до упорного торца замка шита (станины)	46	+0,5	-0,5	1,0	0
B_2	-1	Расстояние между упорными торцами замков станины	365	0	-0,38	0,38	-0,19
B_3	-1	Расстояние от упорного торца замка шита (станины) со стороны вентилятора до внутреннего торца ступицы подшипникового шита	10	+0,1	0	0,1	+0,05
B_4	-1	Размер упорного буртика внутренней подшипниковой крышки со стороны вентилятора	4,5	0	-0,08	0,08	-0,04
B_5	+1	Расстояние между заплечиками подшипниковых шеек вала	394	0	-0,38	0,38	-0,19
B_6	+1	Расстояние от заплечика подшипниковой шейки вала до торца выступающего конца вала	170,5	+0,5	-0,5	1,0	0
B_7	-1	Длина выступающего конца вала	110	+0,5	-0,5	1,0	0
B_{Δ} (l_{31})	-	Расстояние от заплечика выступающего конца вала до оси ближайшего отверстия в лапе	121	+1,96	-1,98	3,94	-0,01

Примечание. По ГОСТ 18709-73 номинальное значение $l_{31}=121$ мм; допустимое отклонение по ГОСТ 8592-71 составляет $\pm 3,0$ мм.

По ГОСТ 18709-73 номинальное значение $l_{31}=121$ мм; допустимое отклонение по ГОСТ 8592-71 составляет $\pm 3,0$ мм.

Таблица 10-3

Обозначение звена	Переда-точное от-ношение ξ_i	Наименование звена размерной цепи	Параметры звена размерной цепи, мм				
			B_i	Δ_B	Δ_H	δ_i	Δ_{0i}
B_1	-1	Размер подшипникового щита от опорного торца фланца до торца замка	75	+0,15	-0,35	0,5	-0,1
B_2	-1	Расстояние между упорными торцами замков станины	365	0	-0,38	0,38	-0,19
B_3	-1	Расстояние от упорного торца замка щита (станины) со стороны вентилятора до внутреннего торца ступицы подшипникового щита	10	+0,1	0	0,1	+0,05
B_4	-1	Размер упорного буртика внутренней подшипниковой крышки со стороны вентилятора	4,5	0	-0,08	0,08	-0,04
B_5	+1	Расстояние между заплечиками подшипниковых шеек вала	394	0	-0,38	0,38	-0,19
B_6	+1	Расстояние от заплечика подшипниковой шейки вала до торца выступающего конца вала	170,5	+0,5	-0,5	1,0	0
B_7	-1	Длина выступающего конца вала	110	+0,5	-0,5	1,0	0
$B_{\Delta} (l_{39})$	-	Расстояние от заплечика выступающего конца вала до опорного торца крепительного фланца	0	+1,81	-1,63	3,44	+0,09

Примечание. Допустимые предельные отклонения размеров l_{39} по ГОСТ 5592-71 составляют ±0,5 мм

силу жестких требований, предъявляемых к этим величинам, а также экономической нецелесообразностью и технической невозможностью изготовления деталей составляющих звеньев с существенно большей точностью, чем это предусмотрено действующей технической документацией. Расчет цепей Γ и Δ проводится для двигателей с наибольшим числом полюсов в данной высоте оси вращения (воздушный зазор таких машин имеет минимальное значение).

При расчете цепей приняты следующие положения:

1) в двигателях установлены шарикоподшипники и роликоподшипники класса точности 6 с радиальными зазорами по основному ряду;

2) зазор в сопряжении щит—корпус полностью выбирается вниз под действием веса ротора и щитов.

При расчете по вероятностному методу дополнительно определяют координату середины поля рассеяния замыкающего звена

$$\Delta_{\omega\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{\omega i} \quad (10-8)$$

и поле рассеяния замыкающего звена

$$\omega_{\Delta} = t \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda'_i \omega_i^2}, \quad (10-9)$$

где $\Delta_{\omega i}$ — координата середины поля рассеяния составляющего звена; ω_i — поле рассеяния составляющего звена; λ'_i — коэффициент относительного рассеяния, характеризующий закон распределения размеров. Для изделий крупносерийного и массового производства предполагается, что кривая рассеяния будет иметь нормальный закон распределения (Гаусса), при котором достаточной для практических расчетов степенью точности можно считать $\lambda'_i = 1/9$; t — коэффициент, который в зависимости от принимаемого процента риска P при совпадении центра группирования с координатой центра отклонения (для нормального закона распределения и равновероятного выхода за обе границы поля допуска) выбирается из следующего ряда (ГОСТ 16320-70):

P	...	32	10	4,5	1,00	0,27	0,1	0,01
t	...	1,0	1,65	2,00	2,57	3,00	3,29	3,89

Для расчета цепей Γ и D принимаем $t=3$, соответствующее проценту риска 0,27. Расчет замыкающих звеньев Γ_{Δ} и D_{Δ} ведется в плоскости $I-I$ (см. рис. 10-1).

Передаточные отношения для цепи Γ

$$[\xi_{\Gamma 1} = -1; \xi_{\Gamma 2} = +1; \xi_{\Gamma 3} = \xi_{\Gamma 4} = -0,5.]$$

Передаточные отношения для цепи D

$$\xi_{D1} = \xi_{D3} = \xi_{D5} = \xi_{D7} = \xi_{D9} = \xi_{D13} = (L - l)/L_1 = \\ = (425 - 126)/425 = 0,7;$$

$$\xi_{D2} = \xi_{D4} = \xi_{D6} = \xi_{D8} = \xi_{D10} = \xi_{D14} = l/L_1 = 126/425 = 0,3;$$

$$\xi_{D11} = \xi_{D12} = 1.$$

Результаты расчетов звеньев Γ_{Δ} и D_{Δ} приведены в табл. 10-4 и 10-5.

10-2. МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Асинхронный двигатель общего назначения с точки зрения взаимодействия деталей представляет собой довольно простой механизм, в котором виды механических воздействий довольно ограничены. Зависят они в основном от условий эксплуатации и в первую очередь от вида сопряжения двигателя с приводимым механизмом. Все сказанное справедливо при условии, что требования к точности монтажа соблюдены и двигатель эксплуатируется в полном соответствии со своим назначением.

Для двигателей общего назначения проводят следующие механические расчеты: жесткости вала, прочности вала, шкивов и ремней клиноременной и плоскоременной передач, зубчатой передачи, долговечности подшипников, прочности крепежных деталей, бандажей, пазовых клиньев ротора (для двигателей с фазным ротором), нажимных шайб, пружин осевого нажатия, подшипников и др. Детали оболочки двигателей (станины, щиты) мощностью до 400 кВт механическим расчетам не подвергаются. Объясняется это тем, что размеры отливок, определяющих механическую прочность, задаются технологическим процессом литья. Опыт проектирования показывает, что даже при самом прогрессивном процессе, позволяющем получать отливки с наиболее тонкими стенками, обеспечивается достаточный запас прочности оболочки. Кроме того, в связи со сложной

Таблица 10-4

Обозначение звена	Переда- точное от- ношение ξ_i	Наименование звена размерной цепи	Параметры звена размерной цепи, мм				
			Γ_i	Δ_B	Δ_H	ω_i	$\Delta_{\omega i}$
Γ_1	-1	Внешний диаметр сердечника ротора	219,1	0	-0,047	0,047	-0,0235
Γ_2	+1	Внутренний диаметр сердечника статора	220	+0,073	-0,1	0,173	-0,0135
Γ_3	-0,5	Отклонение формы наружной поверхности сердечника ротора	0	0	-0,047	0,047	-0,0235
Γ_4	-0,5	Отклонение формы внутренней поверхности сердечника статора	0	+0,09	0	0,09	+0,045
Γ_{Δ}	-	Односторонний воздушный зазор	0,45	+0,098	-0,088	0,186	+0,005

Наименование звена	Передающее отношение ϵ	Наименование деталей и узлов, формирующих звенья размерной цепи	Параметры звена размерной цепи, мм				Наименование звена размерной цепи	Параметры звена размерной цепи, мм			
			Δ_B	Δ_H	δ_i	Δ_{0i}		Δ_B	Δ_H	ω_i	Δ_{0i}
D ₁	0,7	Размер замка шпигота $\varnothing 325$ Н8	+0,089	0	0,089	+0,049	Смещение осей замков шпигота и статора вследствие посаженного зазора со стороны выступающего конца вала	+0,0585	0	0,0585	+0,02925
D ₂	0,3	Размер замка шпигота $\varnothing 325$ Н8	+0,089	0	0,089	+0,049	То же со стороны вентиллятора	+0,0585	0	0,0585	+0,02925
D ₃	0,7	Размер замка шпигота $\varnothing 325$ Н7	+0,028	-0,028	0,056	0	Смещение осей наружного кольца подшипника и отверстия под подшипник вследствие посаженного зазора со стороны выступающего конца вала	+0,0275	0	0,0275	+0,01375
D ₄	0,3	Размер отверстия под подшипник $\varnothing 130$ Н7	+0,08	0	0,04	+0,02	То же со стороны вентиллятора	+0,0275	0	0,0275	+0,01375
D ₅	0,7	Размер наружного кольца подшипника $\varnothing 130$ Н7	0	-0,015	0,015	-0,0075	Смещение осей дорожек качения наружного и внутреннего кольца подшипника вследствие радиального зазора со стороны выступающего конца вала	+0,0325	+0,0125	0,02	+0,0225
D ₆	0,3	Радиальный зазор в подшипнике	+0,065	+0,025	0,04	+0,045	То же со стороны вентиллятора	+0,0325	+0,0125	0,02	+0,0225
D ₇	0,3	Радиальный зазор в подшипнике	+0,033	+0,013	0,02	+0,023	Смещение осей дорожек качения наружного и внутреннего кольца подшипника вследствие радиального зазора со стороны выступающего конца вала	+0,0165	+0,0065	0,01	0,0115

D ₈	0,7	Размер замка шпигота относительно оси отверстия под подшипник	+0,05	0	0,05	+0,025	Смещение осей замков статора относительно оси сердечника статора	+0,0125	-0,0125	0,025	0
D ₉	0,3	Радиальное биение замка шпигота относительно оси отверстия под подшипник	+0,05	0	0,05	+0,025	То же со стороны вентиллятора	+0,0125	-0,0125	0,025	0
D ₁₀	0,3	Радиальное биение дорожки качения наружного кольца подшипника	+0,02	0	0,02	+0,01	Смещение осей дорожек качения и посадочной поверхности наружного кольца подшипника со стороны выступающего конца вала	+0,005	-0,005	0,01	0
D ₁₁	1	Радиальное биение замков статора относительно оси сердечника статора	+0,05	0	0,05	+0,025	То же со стороны вентиллятора	+0,0125	-0,0125	0,025	0
D ₁₂	1	Радиальное биение сердечника ротора относительно общей оси подшипниковых шеек	+0,04	0	0,04	+0,02	Смещение осей сердечника ротора относительно общей оси подшипниковых шеек	+0,01	-0,01	0,02	0
D ₁₃	0,7	Радиальное биение дорожки качения внутреннего кольца подшипника	+0,01	0	0,01	0,005	Смещение осей дорожек качения и посадочной поверхности внутреннего кольца подшипника со стороны рабочего конца вала	+0,0025	-0,0025	0,005	0
D ₁₄	0,3	Радиальное биение дорожки качения внутреннего кольца подшипника	+0,01	0	0,01	0,05	То же со стороны вентиллятора	+0,0025	-0,0025	0,005	0
D ₁₅	—	—	—	—	—	—	Смещение осей сердечника ротора относительно оси сердечника статора	+0,004	+0,03	0,004	0,002

конфигурацией этих деталей расчетные формулы получаются громоздкими и вызывают трудности при инженерных расчетах.

Расчет болтовых соединений и других крепежных деталей достаточно прост, и приводить его нет необходимости. Что же касается расчетов нажимных шайб, бандажей, пазовых клиньев и т. д., то они являются более специфическими и проведение их не всегда является обязательным. Часто размеры этих деталей выбираются из конструктивных, технологических и экономических соображений.

а) Расчет вала

При расчете вала исходными являются данные, полученные при электромагнитном расчете двигателя и при его конструктивной проработке. Размеры выступающего конца вала асинхронных двигателей общего назначения выбираются по нормативно-техническим документам, в которых дается увязка установочных размеров с диаметром и длиной выступающего конца вала. В соответствии с ИСО Р755 допустимый крутящий момент, Н·м, и диаметр выступающего конца вала, мм, находятся в следующей зависимости:

$$M_{кр} = 7,70 \cdot 10^{-3} d_1^3; \quad (10-10)$$

$$M_{кр} = 0,588 \cdot 10^{-3} d_1^{3,5}; \quad (10-11)$$

$$M_{кр} = 0,275 \cdot 10^{-3} d_1^{3,5}. \quad (10-12)$$

Формула (10-10) соответствует случаю действия на выступающий конец вала только крутящего момента, формула (10-11) — совместному действию крутящего момента и изгибающего момента от усилия передачи P_n определенного значения и формула (10-12) — совместному действию крутящего момента и изгибающего момента от усилия передачи неопределенного значения.

Размеры шпонок, а соответственно и шпоночных пазов в зависимости от диаметра выступающего конца вала установлены ГОСТ 8788-68.

Расчет вала на жесткость

В общем случае радиальное усилие передачи (реакция передачи) на выступающий конец вала двигателя равно:

$$P_n = \frac{M_{ном}}{R_0} C_n, \quad (10-13)$$

где $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент двигателя, определяемый по формуле

$$M_{ном} = P_2 / \omega; \quad (10-14)$$

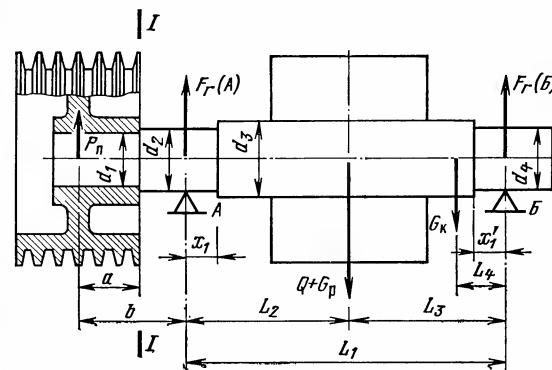


Рис. 10-3. К механическому расчету вала.

P_2 — номинальная мощность двигателя, Вт; ω — угловая скорость, рад/с; C_n — коэффициент, зависящий от способа сопряжения двигателя с приводимым механизмом; R_0 — радиус, на котором расположен элемент, передающий усилие.

При передаче упругой муфтой R_0 — радиус расположения пальцев муфты; $C_n = 0,3$. Для зубчатой передачи R_0 — радиус делительной окружности шестерни; $C_n = 1,09$. Для шкивов R_0 — радиус соприкосновения шкива ремнем; при этом для клиноременной передачи $R_0 = d_p/2$, где d_p — расчетный диаметр шкива по ГОСТ 8089-75, $C_n = 1,8$. Для плоскоременной передачи $C_n = 1,0$ при частоте вращения до 1000 об/мин. При частоте вращения 1500 об/мин и мощности двигателя до 20 кВт рекомендуется принимать $C_n = 5,0$.

При расчете на жесткость проверяется прогиб вала по середине сердечника ротора от действия следующих сил (рис. 10-3):

Вес ротора с валом	G_p
Реакция передачи, определяемая по (10-13)	P_{11}
Вес полумуфты, шкива, шестерни	G_{11}
Вес контактных колец (для двигателя с фазным ротором)	G_K
Одностороннее магнитное притяжение	Q

Для расчета прогиба определяют моменты инерции J_i и вспомогательные параметры: со стороны выступающего конца вала (левая часть) — S_0 , S_1 ; с противоположной стороны (правая часть) — S_2 :

$$J_i = \pi d_i^4 / 64; \quad (10-15)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^2 - x_{i-1}^2}{J_i}; \quad (10-16)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}; \quad (10-17)$$

$$S_2 = \sum_{i=1'}^{m'} \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}. \quad (10-18)$$

В (10-15) — (10-18) J_i — момент инерции i -го участка вала; d_i — диаметр i -го участка вала; x — расстояние от опоры до i -го участка вала.

Обычно при проектных расчетах значения всех этих параметров сводятся в таблицу, форма которой приведена ниже (табл. 10-6).

Прогиб вала под действием веса ротора

$$f_p = \frac{G_p}{3EL_1^2} (L_3^2 S_1 + L_2^2 S_2). \quad (10-19)$$

Прогиб вала под действием веса контактных колец

$$f_K = f_p \frac{\varphi G_K}{G_p}, \quad (10-20)$$

где φ является функцией L_4/L_1 и L_2/L_1 [110].

Для практических расчетов с достаточной степенью точности можно считать прогиб вала от суммарного веса ротора и контактных колец, приложенных в середи-

Таблица 10-6

Часть вала	Номер участков	d_i	J_i	x_i	x_i^2	x_i^3	$\frac{x_i^2 - x_{i-1}^2}{J_i}$	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$
Левая	1							
	2							
	$\cdot \cdot \cdot$							
	m							
		S_0				S_1		
Правая	1'							
	2'							
	$\cdot \cdot \cdot$							
	m'							
		S_2						

не сердечника ротора. В двигателях с вертикальным валом прогиб от веса ротора принимают равным нулю. Прогиб вала от усилия передачи

$$f_{11} = \frac{P_{11} b}{3EL_1^2} [(1,5L_1 S_0 - S_1) L_3 + L_2 S_2]. \quad (10-21)$$

Для определения прогиба от силы одностороннего магнитного притяжения определяют начальный расчетный эксцентриситет ротора e_0 , вызванный неточностью изготовления деталей двигателя, а также статическим прогибом вала от действия веса ротора и от усилия передачи:

$$e_0 = e + f_p + f_{11}, \quad (10-22)$$

где e — эксцентриситет ротора, обусловленный неточностью изготовления деталей.

В большинстве двигателей средней мощности общего назначения эксцентриситет ротора составляет 25—30% воздушного зазора.

Для определения начальной силы одностороннего магнитного притяжения при практических расчетах чаще всего пользуются упрощенной формулой, дающей

вполне приемлемые для инженерной практики результаты.

При числе полюсов $2p=2$

$$Q_0 = D_{a2} l_2 \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5. \quad (10-23)$$

При числе полюсов $2p > 2$

$$Q_0 = 1,5 D_{a2} l_2 \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5; \quad (10-23a)$$

здесь D_{a2} , l_2 — диаметр и длина сердечника ротора; δ — номинальный воздушный зазор.

Прогиб вала от силы одностороннего магнитного притяжения Q_0

$$f_0 = f_p \frac{Q_0}{G_p}. \quad (10-24)$$

При вертикальном расположении вала прогиб его от начальной силы одностороннего магнитного притяжения

$$f_0 = \frac{Q_0}{3EL_1^2} (L_3^2 S_1 + L_2^2 S_2). \quad (10-25)$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения

$$f_m = f_0 / (1 - m), \quad (10-26)$$

где $m \leq f_0 / e_0$.

Суммарный прогиб вала посередине сердечника ротора при сопряжении двигателя с механизмом с помощью муфты, зубчатой передачи, клиноременной и плоскоремненной передачи при вертикальном направлении натяжения ремня

$$f = f_p + f_n + f_m. \quad (10-27)$$

В случае горизонтального направления усилия натяжения ремня при условии, что одностороннее магнитное притяжение действует также в горизонтальной плоскости,

$$f = \sqrt{f_p^2 + (f_n + f_m)^2}. \quad (10-28)$$

Для обеспечения нормальной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы $f \leq 0,1\delta$.

Вторым критерием жесткости вала является обеспечение условия

$$n_{кр} \geq 1,3 n_{ном}, \quad (10-29)$$

где $n_{кр}$ — критическая частота вращения; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения.

Первая критическая частота вращения асинхронного двигателя с достаточной степенью точности может быть определена по формуле

$$n_{кр} = 30 \sqrt{(1 - m) / f_p}. \quad (10-30)$$

Расчет вала на прочность

Изгибающий момент в сечении 1-1 (рис. 10-3)

$$M_{изг} = k_m a (P_n + G_n), \quad (10-31)$$

где k_m — коэффициент перегрузки по моменту.

Изгибающий момент на участке $0 \leq x_i \leq L_z$ при сопряжении муфтой, ременной передачей при вертикальном направлении натяжения ремня и зубчатой передачей

$$M_{изг} = k_m b P_n \left(1 - \frac{x_i}{L_1}\right) + (Q + G_p) L_3 \frac{x_i}{L_1}; \quad (10-32)$$

здесь $Q = Q_0 / (1 - m)$ — сила установившегося одностороннего магнитного притяжения.

При горизонтальном направлении усилия натяжения ремня и условия, что сила одностороннего магнитного притяжения действует также в горизонтальной плоскости, изгибающий момент на участке $0 \leq x_i \leq L_2$:

в вертикальной плоскости

$$M'_{изг} = \frac{G_p L_3}{L_1} x_i; \quad (10-33)$$

в горизонтальной плоскости

$$M''_{изг} = k_m b P_n \left(1 - \frac{x_i}{L_1}\right) + Q \frac{L_3}{L_1} x_i. \quad (10-34)$$

Результирующий изгибающий момент

$$M_{изг} = \sqrt{M'^2_{изг} + M''^2_{изг}}. \quad (10-35)$$

Приведенный момент

$$M_{пр} = \sqrt{M_{изг}^2 + (\alpha k_m M_{ном})^2}, \quad (10-36)$$

где $\alpha = 0,8$ для реверсивных двигателей; $\alpha = 0,6$ для не-реверсивных двигателей.

Приведенное напряжение в i -м сечении

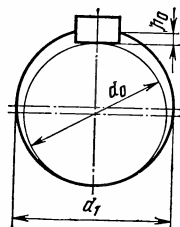
$$\sigma_i = M_{\text{пр}i} / W_i; \quad (10-37)$$

здесь W_i — момент сопротивления при изгибе i -го сечения вала.

Коэффициент запаса прочности в i -м сечении

$$K_{\text{зап}i} = [\sigma_T] / \sigma_i, \quad (10-38)$$

где $[\sigma_T]$ — предел текучести материала вала.



Коэффициент запаса прочности должен удовлетворять условию $K_{\text{зап}i} \geq 1,5$. При поверочном расчете диаметра выступающего конца вала определяют напряжение в сечении I-I (рис. 10-3):

Рис. 10-4. К расчету выступающего конца вала и шпонки.

при кручении

$$\tau = \frac{k_M M_{\text{ном}}}{0,2d_0^3}; \quad (10-39)$$

при совместном действии кручения и изгиба

$$\sigma = M_{\text{пр}} / 0,1d_0^3. \quad (10-40)$$

При необходимости проверки шпонки определяют напряжение смятия

$$\sigma_{\text{ш}} = 2k_M M_{\text{кр}} / d_0 h_0 l_0, \quad (10-41)$$

где l_0 — активная длина шпонки; d_0 и h_0 — по рис. 10-4.

б) Расчет клиноременной передачи

Прежде, чем переходить к рассмотрению непосредственного расчета ременных передач, необходимо кратко сформулировать особенности этого вида передач и требования к отдельным ее элементам. К достоинствам ременных передач следует отнести возможность сопряжения двигателя с механизмом при параллельном расположении их осей; возможность установки механизма на

относительно большом расстоянии от двигателя; возможность установки механизмов на разных уровнях по высоте; плавность и безударность работы передачи; ее простоту и дешевизну. К недостаткам следует отнести повышенную нагрузку на вал и подшипники двигателя поперечной силой от натяжения ремня и веса шкива.

Как следует из (10-13), усилие на выступающий конец вала при сопряжении плоскоременной передачей в 1,65—2,8 раза больше, чем при сопряжении клиноременной, в связи с чем в последнее время отдается все большее предпочтение клиноременной передаче, и поэтому в дальнейшем рассматриваться будет именно этот вид передачи.

Для нормальной работы ременных передач должно быть обеспечено предварительное натяжение ремней.

Оно может осуществляться либо установкой одного из механизмов на подвижное основание, либо при помощи натяжного ролика (рис. 10-5). При выборе величины предварительного натяжения необходимо иметь в виду, что слишком сильное натяжение приводит к преждевременному износу подшипников и опасности разрушения выступающего конца вала, недостаточное — к проскальзыванию ремня (а при плоских ремнях и к возможному сползанию).

Начальная сила натяжения ремня должна быть такой, чтобы и сам ремень мог сохранять свою работоспособность достаточно длительное время, не подвергаясь большей вытяжке. В соответствии с этим для стандартных клиновых ремней принимают начальное напряжение в ремне $\sigma_0 = 1,18 \div 1,47 \cdot 10^6$ Па.

Начальная сила натяжения ремня равна:

$$S_0 = F \sigma_0, \quad (10-42)$$

где F — площадь поперечного сечения всех клиновых ремней передачи.

Клиновые ремни выпускаются стандартных сечений, обозначаемых буквами русского алфавита О, А, Б, В, Г, Д и Е (в порядке возрастания сечений). Рекомендуемые сечения в зависимости от передаваемой мощности и

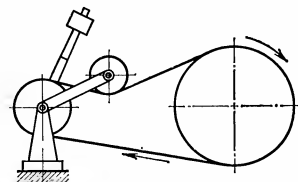


Рис. 10-5. Схема ременной передачи с натяжным роликом.

Таблица 10-7

P_2 , кВт	Рекомендуемые сечения при скорости, м/с			P_2 , кВт	Рекомендуемые сечения при скорости, м/с		
	5	5—10	>10		5	5—10	>10
До 1	О, А	О, А	О	15—30	—	В	В, Г
1—2	О, А, Б	О, А	О, А	30—60	—	Г, Д	В, Г
2—4	А, Б	О, А, Б	О, А	60—120	—	Д	Г, Д
4—7,5	Б, В	А, Б	А, Б	120—200	—	Д, Е	Г, Д
7,5—15	В	Б, В	Б, В	200	—	—	Д, Е

окружной скорости ведущего шкива (ГОСТ 1284-68) приведены в табл. 10-7.

Количество ремней

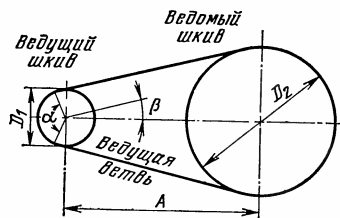


Рис. 10-6. К расчету ременной передачи.

$$z = P_2 / P_0 K_1 K_2, \quad (10-43)$$

где P_0 — мощность, передаваемая одним ремнем (ГОСТ 1284-68), приведена в табл. 10-8; K_1 — коэффициент, зависящий от угла обхвата α , рад, меньшего шкива (табл. 10-9),

$$\alpha \approx \pi - (D_2 - D_1)/A, \quad (10-44)$$

для клиновых ремней рекомендуется принимать $\alpha \geq 2,1$ рад; K_2 — коэффициент, учитывающий режим работы и характер нагрузки. Для асинхронных двигателей с прямым пуском от полного напряжения сети, предназначенных для привода наиболее распространенных механизмов (насосы, компрессоры, воздуходувки, станки и т. д.), рекомендуется принимать $K_2 = 0,73 \div 0,56$; A — межцентровое расстояние (рис. 10-6) по табл. 10-10; D_1 и D_2 — размеры меньшего и большего шкивов.

Наименьшее межцентровое расстояние

$$A_{min} = 0,55 (D_2 + D_1) + h, \quad (10-45)$$

где h — высота ремня (рис. 10-7).

Таблица 10-8

Сечение ремня	Расчетный диаметр ведущего шкива D_p , мм	Мощность P_0 , кВт, при скорости, м/с					
		2	5	10	15	20	25
О	63	0,15	0,36	0,69	1,03	1,26	1,18
	71	0,17	0,39	0,78	1,15	1,38	1,26
	80	0,20	0,45	0,85	1,21	1,51	1,47
	90	0,21	0,49	0,93	1,33	1,67	1,62
	90	0,37	0,74	1,33	1,69	1,84	1,69
А	100	0,37	0,81	1,40	1,87	1,99	1,91
	112	0,37	0,81	1,47	2,63	2,41	2,29
	125	0,44	0,96	1,69	2,29	2,65	2,65
	125	0,59	1,10	2,06	2,88	2,94	2,50
Б	140	0,66	1,25	2,23	3,16	3,6	3,24
	160	0,74	1,40	2,50	3,60	4,35	4,35
	180	0,81	1,65	2,72	3,82	4,71	4,94
В	200	1,03	2,14	3,68	5,28	6,25	5,90
	224	1,10	2,42	4,27	5,97	7,15	6,70
	250	1,25	2,65	4,64	6,34	7,50	7,73
	280	1,33	2,88	5,00	7,07	7,80	8,10
	315	—	4,71	8,45	11,02	11,90	10,08
Г	355	—	5,15	9,20	12,08	13,72	13,32
	400	—	5,59	10,08	13,52	15,72	15,80
	450	—	6,10	10,98	14,56	17,00	17,25
	500	—	7,35	14,00	18,40	20,46	20,46
Д	560	—	8,45	15,95	20,00	23,60	24,30
	630	—	9,43	16,08	22,30	26,50	27,50
	710	—	9,80	18,00	24,10	29,00	31,20

Таблица 10-9

α	3,14	3,0	2,8	2,64	2,46	2,28	2,1	1,93	1,76
K_1	1	0,98	0,95	0,92	0,89	0,86	0,83	0,78	0,74

Таблица 10-10

Переда- точное число	1	2	3	4	6	6 и более
$\frac{A}{D_2}$	1,5	1,2	1	0,95	0,9	0,85

Таблица 10-11

Материал шкива	Допустимая окружная скорость, м/с	Предельные диаметры шкивов, мм, при частоте вращения, об/мин				
		3000	1500	1000	750	600
СЧ12-28	До 25	160	315	450	630	800
СЧ15-32	До 30	180	355	560	710	900
СЧ18-36	До 35	200	400	630	800	1000

Размеры приводных шкивов (диаметр и ширина) выбираются из следующих соображений. Усилие передачи на выступающий конец вала обратно пропорционально расчетному диаметру шкива (10-13), следовательно, механическая прочность этого участка вала и долговечность подшипников определяют наименьший диаметр шкива [73].

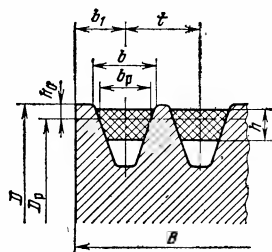


Рис. 10-7. Размеры шкива клиноременной передачи.

Наибольший диаметр шкива определяется допустимой окружной скоростью. Значения наибольших размеров чугуновых шкивов приведены в табл. 10-11.

При окружной скорости свыше 35 м/с следует применять шкивы из стали.

Диаметр шкива должен выбираться по возможности большим в пределах допустимых окружных скоростей для соответствующего материала шкива, а также допустимой скорости ремней (25 м/с — для сечений О, А, Б, В и 30 м/с — для сечений Г, Д, Е). Ширина шкива (рис. 10-7)

$$B = (z - 1)t + 2b_1. \quad (10-46)$$

в) Расчет зубчатой передачи

При расчете нагрузок на выступающий конец вала и подшипники в случае сопряжения двигателя с приводным механизмом с помощью зубчатой передачи пара-

метры передачи, как правило, неизвестны. Расчет передачи в этом случае рекомендуется вести в следующей последовательности [107].

Задаются числом зубьев шестерни, насаживаемой на вал двигателя. Для некорригированных зубчатых передач рекомендуется принимать $z_1 \geq 17$. В быстроходных передачах с целью снижения шума рекомендуется принимать $z_1 \geq 25$. Затем определяется требуемый модуль m .

Для открытых цилиндрических прямозубых передач

$$m = \sqrt[3]{\frac{2}{z_1 \Psi y [\sigma_H]} \frac{K_H K_d P}{\omega}}. \quad (10-47)$$

Для косозубых и шевронных передач

$$m = \sqrt[3]{\frac{2 \cos \beta}{z_1 \Psi y [\sigma_H]} \frac{K_H K_d P}{\omega \Phi_H}}. \quad (10-48)$$

В формулах (10-47), (10-48) приняты следующие обозначения: z_1 — число зубьев шестерни; Ψ — коэффициент ширины зубчатых колес. Этим коэффициентом задаются. Для прямозубых цилиндрических передач $\Psi = 8 \div 15$, для косозубых и шевронных $\Psi = 10 \div 20$; K_H — коэффициент концентрации нагрузки; K_d — коэффициент динамической нагрузки. Для предварительных расчетов при консольном расположении шестерни принимают $K_H K_d = 1,5$; β — угол наклона зубьев. Для косых зубьев принимают $\beta = 8 \div 15^\circ$, для шевронных — $\beta = 25 \div 40^\circ$. Φ_H — коэффициент, учитывающий повышение прочности на изгиб косых и шевронных зубьев по сравнению с прямыми. Для косых и шевронных зубьев при $\beta = 8 \div 25^\circ$ $\Phi_H = 1,3 \div 1,4$. y — коэффициент формы зубьев, выбирается по табл. 10-12, для прямозубых цилиндрических передач с наружным зацеплением — по z_1 , для косозубых и шевронных — по $z_{пр} = z_1 / \cos^3 \beta$; $[\sigma_H]$ — допускаемое напряжение на изгиб:

для нереверсивных двигателей

$$[\sigma_H] = (1,4 \div 1,6) \sigma_{-1} / [K_{зап}] K_{\sigma}; \quad (10-49)$$

Таблица 10-12

z_1 или $z_{пр}$	17	20	25	30	40	50	60	80	100
y	0,357	0,392	0,429	0,451	0,476	0,490	0,499	0,511	0,517

для реверсивных

$$[\sigma_{\text{н}}] = \sigma_{-1} / [K_{\text{зап}}] K_{\sigma}; \quad (10-50)$$

здесь σ_{-1} — предел выносливости материала зубьев при симметричном цикле изгиба; $[K_{\text{зап}}]$ — допускаемый коэффициент запаса прочности; K_{σ} — эффективный коэффициент концентрации напряжений у корня зуба. Значения коэффициентов $[K_{\text{зап}}]$ и K_{σ} приведены в табл. 10-13 и 10-14.

Таблица 10-13

Материал шестерни	$[K_{\text{зап}}]$
Стальная или чугунная отливка:	
без термообработки	2,0
отжиг, нормализация или улучшение	1,8
Стальная поковка:	
объемная или поверхностная закалка	1,8—2,0
нормализация или улучшение	1,5

Таблица 10-14

Материал шестерни	K_{σ}
Стальные с объемной закалкой (>HB 350)	2,0
Стальные нормализованные или улучшенные	1,8
Стальные цементированные или с поверхностной закалкой	1,2

Значение σ_{-1} может быть определено по формуле

$$\sigma_{-1} = (0,4 \div 0,45) \sigma_b, \quad (10-51)$$

где σ_b — предел прочности при растяжении, для стали 35X $\sigma_b = 93 \cdot 10^7$ Па.

Рассчитанное значение модуля m округляется до ближайшего большего стандартного значения (по ГОСТ 9563-60): 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25.

Ширина шестерни

$$b_z = \Psi m; \quad (10-52)$$

диаметр делительной окружности

$$d = mz_1. \quad (10-53)$$

Для проверки правильности выбранных параметров зубчатой передачи (шестерни) определяют угол наклона пружой линии φ , рад, по середине шестерни при нагрузке

$$\varphi_1 = \frac{1,15}{6EJ} \left[k_m P_{\text{п}} L_1 b \left(1 + \frac{b}{L_1} \frac{J}{J_0} \right) + (G_p + Q) L_2 L_3 \left(1 + \frac{L_3}{L_1} \right) \right], \quad (10-54)$$

где J — момент инерции сечения вала по середине сердечника ротора; J_0 — момент инерции сечения подшипниковой шейки вала.

Допустимый угол наклона вала под зубчатой передачей

$$\varphi_{\text{доп}} = 1,5 k_m P_{\text{п}} / b_z^2 \cdot 10^{10}. \quad (10-55)$$

Перекося на длине зуба шестерни

$$C_1 = \varphi_1 b_z. \quad (10-56)$$

Допустимый перекося на длине зуба шестерни

$$C_{\text{доп}} = 10^{-3} b_z. \quad (10-57)$$

г) Выбор усилия и расчет пружин осевого нажатия

Как будет показано в гл. 12, одним из наиболее эффективных способов снижения подшипниковой составляющей шума и вибрации двигателей является осевое нажатие (предварительный натяг) на одно из колец подшипника для компенсации имеющихся в подшипниках радиальных и аксиальных зазоров. Выбор усилия осевого нажатия является сложной задачей, так как усилие должно быть достаточным для достижения поставленной задачи, но вместе с тем не чрезмерно большим, чтобы не перегрузить подшипник.

Необходимое осевое усилие приближенно может быть подсчитано по формуле [106]

$$A_0 = 1,58 \operatorname{tg} \alpha_c F_r \pm 0,5 F_a, \quad (10-58)$$

где α_c — свободный угол контакта; F_r — радиальная нагрузка на подшипник (реакция опоры); F_a — аксиальная нагрузка на подшипник.

Рассчитанные по этой формуле значения осевого усилия корректируются по данным работы подшипников. Наиболее просто нажатие осуществляется с помощью

волнистых пружин (рис. 10-8), которые обеспечивают осевое усилие без какой-либо конструктивной переработки подшипникового узла и его деталей.

По известному осевому усилию можно выбрать размеры пружины

$$A_0 = \frac{E \Delta L h^3 n^4}{1,94 D_{\text{ср}}^3} K. \quad (10-59)$$



Рис. 10-8. Волнистая пружина.

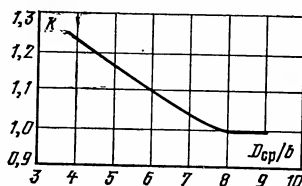


Рис. 10-9. Зависимость $K = f(D_{\text{ср}}/b)$.

Напряжение в пружине

$$\sigma = \frac{12 E \Delta L h n^2}{\pi^2 D_{\text{ср}}^2} = \frac{3 \pi A_0 D_{\text{ср}}}{4 b h^2 n^2}, \quad (10-60)$$

где ΔL — деформация пружины в осевом направлении; b — ширина шайбы (заготовки) в радиальном направлении; h — толщина пружины; n — число волнообразных изгибов пружины; $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр пружины; E — модуль упругости. Значения коэффициента K определяются по рис. 10-9.

Для волнистых пружин, изготавливаемых из пружинной стали, максимальное допустимое напряжение $[\sigma]$ не должно превышать $13,7 \cdot 10^8$ Па. Это напряжение возникает в полностью сжатой, т. е. выпрямленной, пружине. Если принимать во внимание, что в реальных условиях работы случаи полного сжатия пружины встречаются крайне редко, в исключительных случаях это напряжение может быть несколько повышено. Однако значение $13,7 \cdot 10^8$ Па должно рассматриваться как предельно допустимое.

Допустимые отклонения геометрических размеров волнистой пружины должны назначаться исходя из некоторого изменения этих размеров при ее сжатии. Количество волнообразных изгибов пружины может быть любым. На практике оно колеблется от трех до шести.

Рассчитанные по (10-58) усилия осевого нажатия при этом несколько снижать, так как при выборе размеров пружины по (10-59) значение напряжения, как правило, получается больше $13,7 \cdot 10^8$ Па. В первую очередь это относится к волнистым пружинам больших размеров ($D_{\text{ср}} \geq 0,100$ м). При вертикальной установке двигателя пружины осевого поджатия в фиксирующей опоре могут устанавливаться, так как компенсация всех зазоров подшипнике осуществляется за счет веса ротора.

Выбор подшипников. Расчет долговечности

Реакция опор A и B при горизонтальном положении вала (см. рис. 10-3)

$$F_{r(A)} = k_m P_{\Pi} \left(1 + \frac{b}{L_1}\right) + (G_p + Q) \frac{L_3}{L_1}; \quad (10-61)$$

$$F_{r(B)} = k_m P \frac{b}{L_1} + (G_p + Q) \frac{L_2}{L_1}. \quad (10-62)$$

Приведенные формулы справедливы для случая срабатывания двигателя с помощью муфты, зубчатой передачи, а также ременной передачи при вертикальном направлении усилия натяжения ремня.

При горизонтальном направлении усилия натяжения ремня и силы магнитного притяжения реакции опор рассчитываются раздельно в горизонтальной F'_r и вертикальной F''_r плоскостях. Результирующая реакция опор F_r определяется геометрическим сложением составляющих F'_r и F''_r :

$$F'_{r(A)} = k_m P_{\Pi} \left(1 + \frac{b}{L_1}\right) + Q \frac{L_3}{L_1}; \quad (10-63)$$

$$F''_{r(A)} = G_p \frac{L_3}{L_1} + \left(\frac{b}{L_1} + 1\right) G_{\Pi}; \quad (10-64)$$

$$F_{r(A)} = \sqrt{F'^2_{r(A)} + F''^2_{r(A)}}; \quad (10-65)$$

$$F'_{r(B)} = k_m P \frac{b}{L_1} + Q \frac{L_2}{L_1}; \quad (10-66)$$

$$F''_{r(B)} = G_p \frac{L_2}{L_1} - G_{\Pi}; \quad (10-67)$$

$$F_{r(B)} = \sqrt{F'^2_{r(B)} + F''^2_{r(B)}}. \quad (10-68)$$

Реакции в опорах *A* и *B* при вертикальном положении оси вала двигателя

$$F_{r(A)} = k_m P_n \left(1 + \frac{b}{L_1}\right) + Q \frac{L_3}{L_1}; \quad (10-69)$$

$$F_{r(B)} = k_m P_n \frac{b}{L_1} + Q \frac{L_2}{L_1}. \quad (10-70)$$

При горизонтальной установке двигателя аксиальная нагрузка на опоры создается пружиной осевого поджатия

$$F_{a(A)} = A_0; \quad (10-71)$$

$$F_{a(B)} = A_0. \quad (10-72)$$

При вертикальной установке двигателя

$$F_{aA} = 0;$$

$$F_{a(B)} = G_p + G_n \pm A_0. \quad (10-73)$$

Расчет эквивалентной динамической нагрузки для закрепленной опоры производится по ГОСТ 18855-73:

$$P_g = (VXF_r + YF_a) k_\delta k_T. \quad (10-74)$$

Для подшипников с внутренним вращающимся кольцом $V=1$ $k_\delta=1,2 \div 1,5$ (для нормальных условий работы); $k_T=1$ при температуре подшипника $t \leq 100^\circ \text{C}$.

Значения коэффициентов *X* и *Y* для однорядных радиальных шарикоподшипников выбираются по табл. 10-15 (ГОСТ 18855-73).

Таблица 10-15

$\frac{F_a}{C_0^*}$	X	Y	e	$\frac{F_a}{C_0^*}$	X	Y	e
	при $\frac{F_a}{F_r} > e$				при $\frac{F_a}{F_r} > e$		
0,014	0,56	2,3	0,19	0,17	0,56	1,31	0,34
0,028	0,56	1,99	0,22	0,28	0,56	1,15	0,38
0,056	0,56	1,71	0,26	0,42	0,56	1,04	0,42
0,084	0,56	1,55	0,28	0,56	0,56	1,00	0,44
0,11	0,56	1,45	0,30				

* C_0 — статическая грузоподъемность подшипника, см. (10-90), (10-91).

Для «плавающей» опоры при отсутствии пружины осевого нажатия

$$P_g = F_r k_\delta k_T. \quad (10-75)$$

В случае, когда $F_a/F_r \leq e$, принимают $X=1$, $Y=0$. Номинальная долговечность подшипников, млн. оборотов,

$$L = \left(\frac{C}{P_g}\right)^p, \quad (10-76)$$

и номинальная долговечность, ч,

$$L = \left(\frac{C}{P_g}\right)^p \frac{10^6}{60n}. \quad (10-77)$$

Показатель степени $p=3$ для шариковых подшипников и $p=10/3$ — для роликовых.

Таблица 10-16

Вещность <i>L</i>	C/P_g										
	Частота вращения, об/мин										
	500	600	720	750	900	1000	1200	1500	1800	3000	3600
1000	3,11	3,3	3,51	3,56	3,78	3,91	4,16	4,48	4,76	5,65	6,0
1000	3,91	4,16	4,42	4,48	4,76	4,93	5,24	5,65	6,0	7,11	7,56
1000	4,48	4,76	5,06	5,13	5,45	5,65	6,00	6,46	6,87	8,14	8,65
1000	4,93	5,24	5,57	5,65	6,0	6,21	6,60	7,11	7,56	8,96	9,52
1000	5,31	5,65	6,00	6,08	6,46	6,69	7,11	7,66	8,14	9,65	10,26
1000	5,65	6,0	6,37	6,46	6,87	7,11	7,56	8,14	8,65	10,26	10,9
1000	5,94	6,32	6,70	6,80	7,23	7,49	7,96	8,57	9,11	10,8	11,48
1000	6,21	6,6	7,02	7,11	7,56	7,83	8,32	8,96	9,52	11,29	12,0
1000	6,46	6,87	7,30	7,40	7,86	8,14	8,65	9,32	9,90	11,74	12,48
1000	6,69	7,11	7,56	7,66	8,14	8,43	8,96	9,65	10,26	12,16	12,93
1000	6,91	7,34	7,80	7,91	8,41	8,71	9,25	9,97	10,59	12,56	13,34
1000	7,11	7,56	8,03	8,14	8,65	8,96	9,52	10,26	10,90	12,93	13,74
1000	7,31	7,76	8,25	8,36	8,89	9,21	9,78	10,54	11,20	13,28	14,11
1000	7,49	7,96	8,45	8,57	9,11	9,44	10,03	10,80	11,48	13,61	14,46
1000	7,66	8,14	8,65	8,77	9,32	9,65	10,26	11,05	11,75	13,93	14,80
1000	7,83	8,32	8,84	8,96	9,52	9,86	10,48	11,29	12,0	14,23	15,12
1000	7,99	8,49	9,02	9,15	9,72	10,07	10,70	11,52	12,24	14,52	15,43
1000	8,14	8,65	9,20	9,32	9,91	10,26	10,90	11,75	12,48	14,80	15,72
1000	8,29	8,81	9,36	9,49	10,09	10,45	11,10	11,96	12,71	15,07	16,01
1000	8,43	8,96	9,52	9,65	10,26	10,63	11,29	12,16	12,93	15,33	16,28
1000	8,57	9,11	9,68	9,81	10,43	10,80	11,48	12,36	13,14	15,58	16,55
1000	8,71	9,25	9,83	9,97	10,59	10,97	11,66	12,56	13,34	15,82	16,81
1000	8,84	9,39	9,98	10,12	10,75	11,13	11,83	12,74	13,54	16,06	17,06
1000	8,96	9,52	10,12	10,26	10,90	11,29	12,0	12,93	13,74	16,29	17,31
1000	9,08	9,65	10,26	10,4	11,05	11,45	12,16	13,10	13,93	16,51	17,54
1000	9,2	9,78	10,39	10,54	11,20	11,60	12,32	13,28	14,11	16,73	17,78
1000	9,32	9,9	10,53	10,67	11,34	11,74	12,48	13,44	14,29	16,94	18,0
1000	9,43	10,03	10,65	10,80	11,48	11,89	12,63	13,61	14,46	17,15	18,22
1000	9,55	10,14	10,78	10,93	11,61	12,03	12,78	13,77	14,63	17,35	18,43
1000	9,65	10,26	10,90	11,05	11,74	12,16	12,93	13,92	14,80	17,54	18,64
1000	10,16	10,80	11,48	11,63	12,36	12,81	13,61	14,66	15,58	18,47	19,63
1000	10,63	11,29	12,00	12,16	12,93	13,39	14,23	15,33	16,29	19,31	20,52

Значения динамической грузоподъемности подшипников C выбираются по каталожным или справочным данным [106].

По найденному значению отношения C/P , табл. 10-16 и 10-17 определяют долговечность шариковых и роликовых подшипников (соответственно) при различной частоте вращения.

При отсутствии каталожных или справочных данных динамическая грузоподъемность подшипников может быть определена по ГОСТ 18855-73. Для шариковых подшипников:

при $D_{\omega} \leq 25,4$ мм

$$C = 9,81 f_c (i \cos \alpha)^{0,7} z^{2/3} D_{\omega}^{1,8}; \quad (10-78)$$

Таблица 10-17

Долговечность L	$C/P_{\text{э}}$										
	Частота вращения, об/мин										
	500	600	720	750	900	1000	1200	1500	1800	3000	3600
1000	2,77	2,93	3,10	3,13	3,31	3,42	3,61	3,86	4,07	4,75	5,02
2000	3,42	3,61	3,81	3,86	4,07	4,20	4,44	4,75	5,02	5,85	6,18
3000	3,86	4,07	4,30	4,36	4,60	4,75	5,02	5,36	5,67	6,60	6,97
4000	4,20	4,44	4,69	4,75	5,02	5,18	5,47	5,85	6,17	7,20	7,60
5000	4,50	4,75	5,02	5,08	5,36	5,53	5,85	6,25	6,60	7,70	8,13
6000	4,75	5,02	5,30	5,36	5,67	5,85	6,17	6,60	6,97	8,13	8,50
7000	4,97	5,25	5,55	5,62	5,93	6,12	6,46	6,92	7,30	8,51	8,99
8000	5,18	5,47	5,78	5,85	6,17	6,37	6,73	7,20	7,60	8,86	9,36
9000	5,36	5,66	5,98	6,06	6,40	6,60	6,97	7,46	7,88	9,18	9,70
10 000	5,53	5,85	6,17	6,25	6,60	6,82	7,20	7,70	8,13	9,48	10,01
11 000	5,69	6,02	6,35	6,43	6,79	7,00	7,41	7,92	8,36	9,75	10,30
12 000	5,85	6,17	6,52	6,60	6,97	7,20	7,60	8,13	8,59	10,01	10,57
13 000	5,99	6,33	6,68	6,76	7,14	7,37	7,79	8,33	8,79	10,25	10,82
14 000	6,12	6,46	6,83	6,92	7,30	7,54	7,96	8,51	8,99	10,48	11,07
15 000	6,25	6,60	6,97	7,06	7,46	7,70	8,13	8,69	9,18	10,70	11,30
16 000	6,37	6,73	7,11	7,20	7,60	7,85	8,29	8,86	9,36	10,91	11,52
17 000	6,49	6,86	7,24	7,33	7,74	7,99	8,44	9,02	9,53	11,11	11,73
18 000	6,60	6,97	7,36	7,46	7,88	8,13	8,59	9,18	9,70	11,30	11,94
19 000	6,71	7,09	7,49	7,58	8,00	8,26	8,73	9,33	9,85	11,49	12,13
20 000	6,82	7,20	7,60	7,70	8,13	8,39	8,86	9,48	10,01	11,66	12,32
21 000	6,92	7,30	7,71	7,81	8,25	8,51	8,99	9,61	10,16	11,84	12,50
22 000	7,00	7,41	7,82	7,92	8,36	8,63	9,12	9,75	10,30	12,00	12,68
23 000	7,11	7,51	7,93	8,03	8,48	8,75	9,24	9,88	10,43	12,16	12,85
24 000	7,20	7,60	8,03	8,13	8,59	8,86	9,36	10,01	10,57	12,32	13,01
25 000	7,29	7,70	8,13	8,23	8,69	8,97	9,48	10,13	10,70	12,47	13,17
26 000	7,37	7,79	8,22	8,33	8,79	9,08	9,59	10,25	10,82	12,62	13,33
27 000	7,46	7,88	8,32	8,42	8,89	9,18	9,70	10,37	10,95	12,76	13,48
28 000	7,54	7,96	8,41	8,51	8,99	9,28	9,80	10,48	11,07	12,9	13,63
29 000	7,62	8,05	8,50	8,60	9,09	9,38	9,91	10,59	11,19	13,04	13,77
30 000	7,70	8,13	8,59	8,69	9,18	9,48	10,01	10,70	11,30	13,17	13,91
35 000	8,06	8,51	8,99	9,10	9,62	9,91	10,48	11,20	11,84	13,8	14,57
40 000	8,39	8,86	9,36	9,48	10,01	10,33	10,91	11,66	12,32	14,36	15,17

при $D_{\omega} > 25,4$ мм

$$C = f_c (i \cos \alpha)^{0,7} z^{2/3} \cdot 35,77 D_{\omega}^{1,4}. \quad (10-79)$$

Для роликовых подшипников

$$C = 9,81 f_c (i l_{\text{eff}} \cos \alpha)^{7,9} z^{3/4} D_{\omega}^{29/27}. \quad (10-80)$$

В нормальных асинхронных двигателях, как правило, применяются однорядные радиальные шариковые и роликовые подшипники, у которых $\alpha=0$; $i=1$, и формулы могут быть записаны в виде

$$C = 9,81 f_c z^{2/3} D_{\omega}^{1,8}; \quad (10-81)$$

$$C = 35,77 f_c z^{2/3} D_{\omega}^{1,4}; \quad (10-82)$$

$$C = 9,81 f_c l_{\text{eff}}^{7,9} z^{3/4} D_{\omega}^{29/27}. \quad (10-83)$$

В формулах (10-81) — (10-83) f_c — коэффициент динамической грузоподъемности; α — угол контакта; l_{eff} — длина контакта ролика с кольцом, мм; i — число рядов тел качения в подшипнике; D_{ω} — диаметр тел качения, мм; z — число тел качения в подшипнике.

Значения коэффициента f_c выбирают по табл. 10-18.

Количество шариков в подшипнике

$$z \approx 2,9 \frac{D+d}{D-d}. \quad (10-84)$$

Количество роликов в подшипнике

$$z \approx 5 \frac{D+d}{D-d}. \quad (10-85)$$

Размеры шариков для подшипников всех размеров сверхлегкой и особолегкой серий и всех подшипников

Таблица 10-18

$D_{\omega} \cos \alpha$	f_c		$D_{\omega} \cos \alpha$	f_c	
	шариковые	роликовые		шариковые	роликовые
d_m			d_m		
0,08	5,39	7,31	0,22	6,08	7,92
0,10	5,66	7,53	0,24	6,01	7,87
0,12	5,86	7,76	0,26	5,93	7,76
0,14	6,00	7,87	0,28	5,83	7,64
0,16	6,08	7,92	0,30	5,71	7,53
0,18	6,11	7,98	0,32	5,58	—
0,20	6,11	7,98	0,34	5,43	—

остальных исполнений с диаметром отверстия под вал до 45 мм

$$D_{\omega} \approx 0,3(D-d). \quad (10-86)$$

Для подшипников с диаметром отверстия под вал выше 45 мм легкой, средней и тяжелой серий

$$D_{\omega} \approx 0,32(D-d). \quad (10-87)$$

Размеры роликов для подшипников сверхлегкой и легкой серий

$$D_{\omega} \approx (0,2 \div 0,22)(D-d). \quad (10-88)$$

Для подшипников легкой, средней и тяжелой серий

$$D_{\omega} \approx 0,25(D-d). \quad (10-89)$$

В формулах (10-86) — (10-89) принято: D — наружный диаметр подшипника; d — диаметр отверстия подшипника под вал; $d_m = (D+d)/2$ — средний диаметр подшипника.

Статическая грузоподъемность подшипников шариковых (радиальных и радиально-упорных)

$$C_0 = 12,26izD_{\omega}^2 \cos \alpha; \quad (10-90)$$

роликовых (с короткими цилиндрическими роликами, конических и сферических)

$$C_0 = 21,6izl_{eff} D_{\omega} \cos \alpha. \quad (10-91)$$

е) Расчет динамического момента инерции ротора

Динамический момент инерции ротора асинхронного двигателя J_p относительно оси вращения можно представить как

$$J_p = \sum J_i = \sum m_i r_i^2, \quad (10-92)$$

где m_i — масса i -го элемента (детали, сборочной единицы ротора); r_i — радиус инерции i -го элемента ротора относительно оси вращения.

Рекомендуется разбивать ротор на следующие элементы: вал; сердечник; обмотка; вентилятор; обмоткодержатель (для двигателя с фазным ротором); контактные кольца.

Элементы ротора, имеющие достаточно сложную конфигурацию (вентилятор, обмоткодержатель), рекомен-

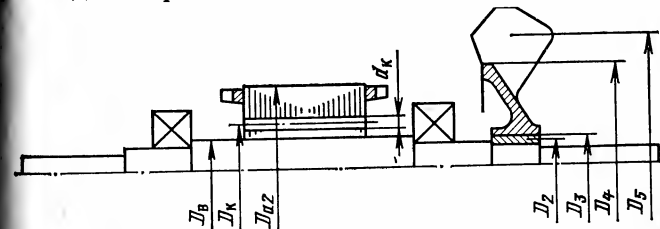
дуются разбивать на отдельные тела (детали) простейшей формы.

Определим динамические моменты инерции однородных тел простейшей формы.

Динамический момент инерции сплошного цилиндра относительно вала

$$J = 0,125m_i d_i^2, \quad (10-93)$$

d — диаметр вала i -го участка.



а. 10-10. К расчету момента инерции ротора.

Динамический момент инерции цилиндра из стали

$$J = 0,75D^4L. \quad (10-94)$$

Динамические моменты инерции тел, подобных по форме цилиндру,

$$J = 0,125m(D^2 + d), \quad (10-95)$$

где D и d — соответственно внешний и внутренний диаметры цилиндра.

Определим динамические моменты инерции элементов ротора (рис. 10-10).

Динамический момент инерции вала

$$J_v = 0,75 \sum d_i^4 L_i \cdot 10^3. \quad (10-96)$$

Динамический момент инерции сердечника

$$J_c = 0,75 [D_{a2}^4 - D_b^4 - 2d_k^2 m_k D_k^2 - 2,5b_{\pi} h_{z2} z_2 (D_{a2} - h_{z2})^2] l_{a2} \cdot 10^3. \quad (10-97)$$

Динамический момент инерции обмотки короткозамкнутого ротора с вентиляционными лопатками

$$J_{отм} = m_{обм2} \frac{(D_{a2} - h_{z2})^2}{4}. \quad (10-98)$$

Динамический момент инерции вентилятора

$$J_{\text{вент}} = m_2 \frac{D_2^2}{4} + 0,125m_3 (D_4^2 + D_3^2) + m_5 \frac{D_5^2}{4}. \quad (10-99)$$

Динамический момент инерции ротора

$$J_p = J_v + J_c + J_{\text{обм}} + J_{\text{вент}}. \quad (10-100)$$

В формулах (10-97) — (10-100) приняты обозначения: D и d — диаметры элементов ротора по рис. 10-10; m_n — количество и диаметр аксиальных каналов сердечника ротора; z_2 — число пазов сердечника ротора; b_n — ширина паза; h_{z2} — высота паза; m — масса соответствующих элементов ротора или их составных тел.

Глава одиннадцатая

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

11-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Основные термины в области надежности изделий, общие для разных отраслей промышленности, устанавливает ГОСТ 13377-75.

В электромашиностроении употребляются не все термины, указанные в стандарте. Под изделием в электромашиностроении обычно понимают электрическую машину, под элементом — узел. Если рассматривается надежность узла, то в качестве элементов могут выступать части узла, например, при рассмотрении надежности обмотки элементами будут пары соседних проводников.

Надежность — это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Работоспособность — это состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Нарушение работоспособности называется отказом.

В теории надежности термин «продолжительность работы» заменяется более широким понятием — нара-

ботка, которая может измеряться как в часах, так и в других единицах, характеризующих объем произведенной работы (в километрах, килограммах, штуках и т. д.). Свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки называется безотказностью.

Для неремонтируемых изделий, каковыми являются асинхронные машины¹, наиболее подходящим показателем безотказности является вероятность безотказной работы (ВБР). Вероятность безотказной работы — это вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникает отказ изделия. Формально повысить ВБР можно путем уменьшения заданной наработки, но потребитель требует вполне определенной наработки изделия, т. е. изделие должно обладать долговечностью. Долговечность — это свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, оговоренного технической документацией. Показателями долговечности являются «ресурс» и «срок службы». Ресурсом называют наработку до предельного состояния, а сроком службы — календарное время до предельного состояния или до списания. Для массовых изделий очень удобным показателем, который объединяет показатели безотказности и долговечности, является «гамма-процентный ресурс». Гамма-процентным ресурсом называется наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью гамма-процентов.

Основными показателями, которыми пользуются для характеристики надежности асинхронных двигателей, являются вероятность безотказной работы и гамма-процентный ресурс.

11-2. ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Довоенные и первые послевоенные серии асинхронных двигателей не обладали достаточной надежностью. В 60-х годах в Советском Союзе подвергалось капитальному ремонту около 20% парка асинхронных двигателей. Основные причины отказов: неправильное обслуживание, низкое качество материалов, значительный

¹ Асинхронные машины должны считаться неремонтируемыми изделиями, так как восстановленный двигатель в части показателей надежности существенно хуже нового.

нагрев изоляции, низкое качество изготовления, повышенная скорость нарастания температуры обмоток в аварийных режимах.

В Советском Союзе, начиная с 1962 г., проводятся систематические наблюдения за работой асинхронных двигателей в эксплуатации. В результате этих наблюдений установлено, что вероятность безотказной работы двигателей серий А, АО, А2, АО2 составляет примерно 0,8 за 10 тыс. ч и 0,7 за 20 тыс. ч [10, 117]. По вине обмотки происходит примерно 85% всех отказов. Отказы двигателей по вине подшипников составляют 10%.

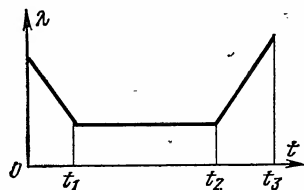


Рис. 11-1. Изменение интенсивности отказов во время эксплуатации.

Изменение интенсивности отказов асинхронных двигателей во времени имеет характерный вид, показанный на рис. 11-1.

Первый участок кривой (0— t_1) называется периодом приработки. В этот период выявляются скрытые дефекты, не обнаруженные службой технического контроля завода-изготовителя. По мере выявления скрытых дефектов интенсивность отказов падает до постоянного значения, характеризующего участок нормальной эксплуатации (t_1 — t_2). На этом участке отказы происходят по случайным внешним причинам, не зависящим от двигателя: перегрузки, аварийные изменения среды и т. д. Этот период длится 15 000—25 000 ч.

В период нормальной эксплуатации, когда скрытые дефекты уже выявлены, а старение изоляции еще незначительно, двигатели чаще всего выходят из строя по вине обмоток, если последние имеют большую скорость нарастания температуры при заторможенном роторе [см. (1-2)] или недостаточно защищены от проникновения влаги.

В третьем периоде (t_2 — t_3) начинает существенно сказываться старение изоляции. Этому участку соответствует возрастающая интенсивность отказов.

Наименее надежной в эксплуатации является витковая изоляция эмалированных проводов. В большинстве случаев причиной отказов двигателей в период приработки являются дефекты эмалевого покрытия провода,

находящиеся в состоянии поставки или возникшие в процессе изготовления обмоток. Число наносимых повреждений зависит от механической стойкости эмалевого покрытия, коэффициента заполнения паза, усилий при наладке обмотки.

В третьем периоде (t_2 — t_3) основное влияние на интенсивность отказов оказывает температура изоляции. Снижение нагрева изоляции, безусловно, повышает срок службы, однако снижать температуру в номинальном режиме машины в большинстве случаев нецелесообразно. Превышения температуры активных частей машины не считаются при крайне редкой в эксплуатации температуре охлаждающей среды +40°C. Кроме того, как правило, электромашиностроительные заводы изготавливают двигатели с запасом по превышению температуры в номинальном режиме, равным 7—10°C; нагрузки же машин в эксплуатации значительно ниже номинальных. Особенно это характерно для станочного парка, где среднее значение коэффициента загрузки равно 24%. Даже двигатели насосов и вентиляторов, т. е. механизмов с длительной стационарной нагрузкой, нагружены по мощности в среднем на 70—75%.

11-3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБМОТКИ

В отличие от электромагнитных, тепловых и механических расчетов расчеты надежности асинхронных двигателей были введены в практику конструкторских бюро лишь в конце 60-х годов. Как было указано выше, отказы обмотки составляют 85% всех отказов, поэтому расчет ее надежности интересует промышленность в первую очередь. Расчет долговечности подшипников рассмотрен в гл. 10.

Наиболее подходящими показателями надежности для неремонтируемой обмотки являются ВБР и гамма-процентный ресурс.

Отказы витковой, корпусной и междупазовой изоляции являются независимыми событиями, поэтому вероятность безотказной работы обмотки за время t $R_{обм}(t)$ равна произведению вероятностей безотказной работы $R_v(t)$, корпусной $R_k(t)$, междупазовой $R_m(t)$ изоляции за это время, т. е.

$$R_{обм}(t) = R_v(t) R_k(t) R_m(t). \quad (11-1)$$

а) Расчетная схема отказа изоляции

Неповрежденная изоляция электрических машин при напряжении до 1000 В имеет большие запасы электрической прочности, и возникающие коммутационные переключения напряжения не приводят к ее пробое. Колебания толщин изоляции и пробивных напряжений лежат в пределах, исключающих пробои. Пробой всегда наступает внезапно, что не дает возможности предсказать отказ. Местом пробоя являются поврежденные участки со значительно пониженным пробивным напряжением. Общая площадь этих участков ничтожно мала по сравнению с площадью неповрежденной изоляции. Обычно рабочее напряжения недостаточно для пробоя даже поврежденных участков изоляции, и пробой происходит в результате возникновения коммутационного перенапряжения, которое в 10—12 раз превышает рабочее напряжение [118]. В ряде случаев после пробоя пробивное напряжение не падает до нуля, а лишь снижается на некоторое значение. Такое положение характерно для перекрытия по поверхности без принципиального химического изменения материала в канале пробоя.

Итак, пробой изоляции машин, как правило, происходит в результате перекрытия по поверхности изоляции промежутка между поврежденными участками.

Важнейшим параметром изоляции, определяющим ее надежность, является дефектность. Дефектностью назовем среднее число повреждений n на единицу измерения (площади или длины) L :

$$\lambda = n/L. \quad (11-2)$$

Состояние поверхности также оказывает влияние на надежность, так как определяет электрическую прочность перекрытия E .

Принципиально схема расчета надежности очень проста. Вероятность пробоя изоляционного промежутка при единичном воздействии импульса коммутационного перенапряжения

$$q = P\{U_k > U_z\} P\{U_k > U_{min}\}, \quad (11-3)$$

где $U_z = zE$; z — длина промежутка между дефектами; U_k — коммутационное перенапряжение, приходящееся на промежуток.

Введение $U_{min} = 300$ В учитывает то обстоятельство, по закону Пашена пробивное напряжение промежутка может быть меньше определенного значения. Вероятность безотказной работы промежутка

$$R_1 = 1 - q. \quad (11-4)$$

Вероятность безотказной работы всей системы

$$R_n = (1 - q)^n, \quad (11-5)$$

n — среднее число промежутков.

Сложность расчета надежности заключается в том, что все параметры, входящие в расчет, случайны и имеют различные законы распределения.

б) Вероятность безотказной работы витковой изоляции

Вероятность пробоя витковой изоляции [112, 113] зависит от коэффициента заполнения паза и ориентации проводов в пазу относительно друг друга. От коэффициента заполнения зависит число плотно касающихся участков, и, следовательно, пробивное напряжение. Ориентация проводов в пазу определяет распределение перенапряжений между касающимися витками.

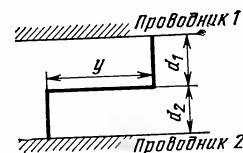


Рис. 11-2. Возможный путь пробоя витковой изоляции.

Потенциально возможный путь пробоя изоляционного промежутка между двумя соседними проводниками состоит из двух участков длиной d_1 и d_2 от проводников к поверхности эмалевого покрытия и промежутка y между этими участками (рис. 11-2). Каждый участок изоляционного промежутка может быть заполнен изоляционным материалом (эмалью или пропиточным лаком) или воздухом. Возможны следующие состояния отдельных составляющих:

A — слой эмали не имеет повреждения, вероятность такого состояния $P\{A\} = 1 - p$.

$\bar{A}$ — слой эмали имеет сквозное повреждение, $P\{\bar{A}\} = p$.

B — между проводами имеется зазор, $P\{B\} = 1 - g$.

$\bar{B}$ — провода плотно касаются, $P\{\bar{B}\} = g$.

C — промежуток между проводниками заполнен пропиточным лаком, $P\{C\}=1-c$.

$\bar{C}$ — промежуток между проводниками заполнен воздухом, $P\{\bar{C}\}=c$.

Сочетание состояний составляющих промежуток и их вероятности приведено в табл. 11-1.

Таблица 11-1

Тип промежутка	Состояние составляющих промежутка	Вероятность состояния
1111	$\bar{A} \bar{A} \bar{B} \bar{C}$	$p^2 g c$
1112	$\bar{A} \bar{A} \bar{B} C$	$p^2 g (1-c)$
1121	$\bar{A} \bar{A} B \bar{C}$	$p^2 (1-g) c$
1122	$\bar{A} \bar{A} B C$	$p^2 (1-g) (1-c)$
1211 и 2111	$\bar{A} A \bar{B} \bar{C}$ и $A \bar{A} \bar{B} \bar{C}$	$2p(p-1) g c$
1212 и 2112	$\bar{A} A \bar{B} C$ и $A \bar{A} \bar{B} C$	$2p(p-1) g (1-c)$
1221 и 2121	$\bar{A} A B \bar{C}$ и $A \bar{A} B \bar{C}$	$2p(p-1) (1-g) c$
1222 и 2122	$\bar{A} A B C$ и $A \bar{A} B C$	$2p(p-1) (1-g) (1-c)$
2211	$A A \bar{B} \bar{C}$	$(p-1)^2 g c$
2212	$A A \bar{B} C$	$(p-1)^2 g (1-c)$
2221	$A A B \bar{C}$	$(p-1)^2 (1-g) c$
2222	$A A B C$	$(p-1)^2 (1-g) (1-c)$

Из всего многообразия состояния составляющих изоляционных промежутков реально могут пробиваться только промежутки типа 111, т.е. плотно касающиеся провода с поврежденной изоляцией. Это наглядно видно из табл. 11-2, в которой приведены вероятности пробоя промежутков различных типов в обмотке двигателя 4А112М4.

Таблица 11-2

Тип промежутка	Вероятность состояния	Среднее число промежутков в обмотке	Вероятность пробоя хотя бы одного промежутка при $U_{cp}=4000$ кВ
111	$0,194 \cdot 10^{-5}$	1,45	$0,225 \cdot 10^{-1}$
112	$0,310 \cdot 10^{-6}$	0,232	$0,37 \cdot 10^{-5}$
121—211	$0,258 \cdot 10^{-1}$	1936	$0,12 \cdot 10^{-11}$
221	0,86	645 000	$0,26 \cdot 10^{-12}$

Вероятность пробоя одного промежутка типа 1111 длиной z при воздействии одного импульса коммутационного перенапряжения определяется формулой

$$q_{1z} = 3 \int_0^1 F \left(\frac{k\bar{U}_c - \bar{U}_z}{\sqrt{k^2 \sigma_{Uc}^2 + \sigma_{Uz}^2}} \right) \times \\ \times F \left(\frac{k\bar{U}_c - U_{min}}{k\sigma_{Uc}} \right) (k^2 - 1) dk, \quad (11-6)$$

где $\bar{U}_c$ и σ_{Uc}^2 — среднее значение и дисперсия коммутационного перенапряжения, приходящегося на катушку индуктивности;

$$\bar{U}_c = \bar{U}_\phi / n_c; \quad \sigma_{Uc} = \sigma_{U\phi} / n_c; \quad (11-7)$$

где $\bar{U}_\phi$ и $\sigma_{U\phi}$ — среднее значение и среднее квадратическое отклонение фазного коммутационного перенапряжения; для асинхронных двигателей $\bar{U}_\phi = 1,55$ кВ, $\sigma_{U\phi} = 0,54$ кВ; n_c — число последовательно соединенных катушек обмотки фазы; $\bar{U}_z$ и σ_{Uz}^2 — среднее значение и дисперсия пробивного напряжения промежутка z ; k — относительное расстояние от начала обмотки до рассматриваемого промежутка, $k=0 \div 1$; $F(x)$ — функция Лапласа.

Среднее значение $\bar{U}_z$, кВ, и среднее квадратическое отклонение σ_{Uz} , кВ, напряжения перекрытия промежутка длиной z можно определить по экспериментально установленным зависимостям

$$\bar{U}_z = -0,96 + 1,2z - 0,08z^2 + 0,016\Theta + 0,05\varphi - \\ - 0,00035\varphi^2 - 0,00029\varphi\Theta; \quad (11-8)$$

$$\sigma_{Uz} = 0,19 + 0,07z + 0,0004\Theta, \quad (11-9)$$

где Θ — температура обмотки, °С; φ — относительная влажность окружающей среды, %.

Не всякое перекрытие изоляционного промежутка коммутационным перенапряжением приводит к короткому замыканию соседних проводников. Дело в том, что при перекрытии по поверхности в отличие от пробоя по толщине не происходит значительного разрушения изоляции. При каждом перекрытии пробивное напряжение снижается. Вероятность короткого замыкания при од-

ном перекрытии может быть определена по эмпирической формуле

$$P\{K/\Pi\} = 1 - \exp\left[-\frac{k(0,007U_{mc} + 0,00015U_c)}{z}\right], \quad (11-10)$$

где U_{mc} — амплитудное значение рабочего напряжения катушки (секции), кВ.

С учетом (11-10) и (11-6) вероятность возникновения короткого замыкания после воздействия одного импульса коммутационного перенапряжения примет следующий вид:

$$q_z(U_c) = 3 \int_0^1 F\left(\frac{k\bar{U}_c - \bar{U}_z}{\sqrt{k^2\sigma_{Uc}^2 + \sigma_{Uz}^2}}\right) F\left(\frac{k\bar{U}_c - U_{min}}{k\sigma_{Uc}}\right) \times \\ \times \left\{1 - \exp\left[-\frac{k(0,007U_{mc} + 0,00015U_c)}{z}\right]\right\} (k^2 - 1) dk. \quad (11-11)$$

Эксплуатационные факторы — в основном температура и динамические усилия при коммутационных операциях — постепенно разрушают изоляцию. В ней появляются трещины. Можно считать, что зависимость дефектности при неизменных условиях эксплуатации от времени старения определяется выражением

$$\lambda_B(t) = \lambda_0 + H_B t, \quad (11-12)$$

где λ_0 — начальная дефектность в состоянии поставки двигателя, 1/мм; H_B — скорость дефектообразования, 1/(мм·ч);

$$H_B = c \exp[a_1(\Theta - \Theta_{max}) - a_2(\Theta - \Theta_{max})^2 + bf_{\Pi}], \quad (11-13)$$

где Θ_{max} — предельно допускаемая температура; f_{Π} — расчетная частота коммутационных операций, 1/ч.

Для провода ПЭТВ на основе экспериментальных данных были получены следующие значения коэффициентов уравнения (11-13): $a_1 = 0,60 \cdot 10^{-1}$; $a_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$; $b = 0,15 \cdot 10^{-2}$; $c = 0,33 \cdot 10^{-6}$.

Средняя вероятность виткового замыкания в одном участке типа 1111 в интервале времени $t - \Delta t$, t

$$\Theta_B(t, \Delta t) = \int_0^\infty f(z, t) [1 - q_z(U_c) t^{\Delta t}] dz, \quad (11-14)$$

$f(z, t)$ — композиция распределения длин участков

и

$$f(z, t) = 2\lambda_B(t) \exp\{-2\lambda_B(t)[z - 2\bar{d} - \lambda_B(t)\sigma_d^2]\} F\left(\frac{z - 2\bar{d} - 2\lambda_B(t)\sigma_d^2}{\sigma_d}\right), \quad (11-15)$$

$\bar{d}$ и σ_d — параметры нормального распределения односторонней толщины изоляции провода.

Условная вероятность отказа машины по вине витковой изоляции в интервале времени $t - \Delta t$, t при условии, в предшествующее время не произошел отказ машины,

$$Q_{B, \text{усл}}(t, \Delta t) = 1 - [1 - Q_B(t, \Delta t)]^{n_1}, \quad (11-16)$$

где n_1 — математическое ожидание числа участков типа 11 в обмотке.

Величина n_1 рассчитывается по формуле

$$n_1 = gL\lambda_B(t), \quad (11-17)$$

где L — общая длина пары соседних витков во всей обмотке,

$$L = (1 - P_{\Pi})(S_{\text{нар}} + 1,5S_{\text{внут}} - 1,5)k_{\text{сл}}l_{\omega}z_1; \quad (11-18)$$

здесь $k_{\text{сл}}$ — число слоев обмотки; $S_{\text{нар}}$ — число проводников в наружном слое паза; $S_{\text{внут}}$ — число проводников во внутренних слоях паза; z_1 — число пазов статора; P_{Π} — доля соседних элементарных проводников, принадлежащих к одному эффективному, т.е. находящимся под одним потенциалом,

$$P_{\Pi} = \left[1 - \left(1 - \frac{n_{\text{эл}} - 1}{S_{\Pi}}\right)^3\right] \left[\frac{S_{\Pi}}{2S_{\Pi} - n_{\text{эл}}}\right], \quad (11-19)$$

где $n_{\text{эл}}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; S_{Π} — общее число проводников в пазу.

Вероятность плотного касания проводов определяется коэффициентом заполнения паза k_3

$$g = 0,93 \sqrt{k_3}. \quad (11-20)$$

Безусловная вероятность отказа в интервале $t - \Delta t$, t

$$Q_B(t, \Delta t) = Q_{B, \text{усл}}(t, \Delta t) R_B(t - \Delta t), \quad (11-21)$$

где $R_B(t - \Delta t)$ — ВБР в интервале $(0, t - \Delta t)$.

Вероятность безотказной работы витковой изоляции в интервале $(0, t)$

$$R_v(t) = 1 - \sum_{j=0}^{j=t/\Delta t} Q_v(j\Delta t, \Delta t). \quad (11-22)$$

в) Вероятность безотказной работы корпусной изоляции

Корпусная изоляция современных электрических машин на напряжение до 1000 В является многослойной, причем по крайней мере один слой в случае отсутствия повреждений не может быть пробит коммутационным перенапряжением. Качество листовой изоляции также характеризуется дефектностью λ . После старения при температуре Θ в течение времени t дефектность определяется выражением

$$\lambda(t) = \lambda_0 + Ht; \quad (11-23)$$

$$H = c \exp[a(\Theta - \Theta_{max})].$$

Значения H для некоторых материалов при $\Theta = \Theta_{max}$ приведены в табл. 11-3.

Путь перекрытия состоит из отдельных участков (рис. 11-3). Толщины d_i имеют нормальное распределение, расстояния между дефектами a_{ij} распределены по

Таблица 11-3

Наименование материала	Толщина, мм	$H, 1/(\text{мм}^2 \cdot \text{ч})$
Пленка ПЭТФ	0,20	$0,55 \cdot 10^{-10}$
	0,25	$0,33 \cdot 10^{-10}$
	0,05	$0,47 \cdot 10^{-8}$
Изофлекс	0,22	$0,12 \cdot 10^{-9}$
Пленкоэлектрокартон	0,27	$0,14 \cdot 10^{-9}$
Стеклослоупласт		
ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	0,45	$0,47 \cdot 10^{-9}$
ГИП-ЛСП-ЛСЛ	0,45	$0,46 \cdot 10^{-11}$
ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,45	$0,19 \cdot 10^{-10}$
Тривольтерм F	—	$0,46 \cdot 10^{-11}$
Полиимидная пленка	0,04	$0,82 \cdot 10^{-9}$
ПМ		
Стекломиканит Г ₂ ФКП	0,35	$0,17 \cdot 10^{-8}$
Стеклолакоткань ЛСК	0,12	$0,12 \cdot 10^{-6}$

казательному закону. Принципиально можно определить плотность распределения суммы расстояний d_i и a_{ij} , однако фактически приходится использовать не распределения величин d и a , а распределения их крайних (минимальных) значений.

На рис. 11-3 показано, что слой имеет три рядом расположенных повреждения. Естественно, что пробой произойдет по дефекту 13, так как он ближе расположен к дефекту слоя 2. Указанное обстоятельство сильно усложняет работы, поэтому более целесообразен расчет вероятности пробоя отдельных элементарных участков, в пределах которых вероятность существования двух дефектов пренебрежимо мала.

Радиус элементарного участ-

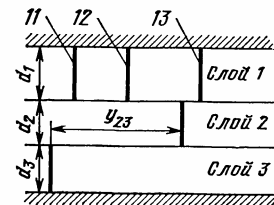


Рис. 11-3. Возможные пути пробоя корпусной изоляции.

$$r_{эл} = \frac{x_k(U_{max}) - \sum_{i=1}^n d_i}{n-1}, \quad (11-24)$$

где $x_k(U_{max})$ — среднее значение расстояния перекрытия по поверхности максимальным фазным перенапряжением U_{max} ; n — число слоев.

Вероятность того, что за период t элементарный участок окажется поврежденным,

$$P = 1 - \exp[-\lambda(t) \pi r^2]. \quad (11-25)$$

Не каждое перекрытие коммутационным перенапряжением приводит к пробоя на корпус. Можно считать, что первичное перекрытие только фиксирует сквозное повреждение — путь будущего пробоя.

Вероятность пробоя при воздействии единичного импульса перенапряжения

$$q_1 = \int_0^1 F\left(\frac{kU_\Phi - \bar{U}_z}{\sqrt{k^2 \sigma_{U_\Phi}^2 + \sigma_{\bar{U}_z}^2}}\right) F\left(\frac{kU_\Phi - U_{z \min}}{k\sigma_{U_\Phi}}\right) \times$$

$$\times \left[1 - \exp\left(-\frac{k^2 c_o c_u U_\Phi \bar{U}_\Phi}{z^2}\right)\right] dk; \quad (11-26)$$

$$z = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (11-27)$$

где $c_u = 1/\bar{E}_u = 0,16$ мм/кВ; $c_v = 1/E_v = 0,11$ мм/кВ.

Вероятность короткого замыкания на одном сквотном повреждении в интервале времени $t - \Delta t$, t

$$q_1(t, \Delta t) = 1 - (1 - q_1)^{f_n \Delta t}. \quad (11-28)$$

Условная вероятность отказа корпусной изоляции в интервале времени $t - \Delta t$, t при условии, что ранее не произошел отказ обмотки,

$$Q_{k, \text{усл}}(\Delta t) = 1 - [1 - q_1(t, \Delta t)]^{n_t}, \quad (11-29)$$

где n_t — среднее число элементарных участков с совпадающими повреждениями.

Безусловная вероятность отказа корпусной изоляции в интервале времени $t - \Delta t$, t

$$Q_k(t, \Delta t) = Q_{k, \text{усл}}(t, \Delta t) R_k(t - \Delta t). \quad (11-30)$$

Вероятность безотказной работы корпусной изоляции в течение времени $(0, t)$

$$R_k(t) = 1 - \sum_{j=0}^{j=t/\Delta t} Q_k(j\Delta t, \Delta t). \quad (11-31)$$

Вероятность безотказной работы междофазной изоляции $R_m(t)$ может быть принята равной 1.

11-4. НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

За 10 лет, т. е. примерно за период смены серии производительность труда в Советском Союзе возрастает в 1,9 раза. Примерно так же возрастает и электрооборуженность промышленности, так как она линейно связана с производительностью труда. Удельный ущерб от отказа двигателя пропорционален электрооборуженности, так как отказ одного из двигателей объекта, например станка, оценивается как отказ объекта. Поэтому для сохранения ущерба от отказов двигателей на прежнем уровне следует за 10 лет уменьшать вероятность отказа двигателей в 1,9 раза. Это соотношение выдержано

серии 4А, у которой вероятность безотказной работы за 10 000 ч составляет 0,9, причем ВБР статорной обмотки — 0,92, ВБР остальных узлов — 0,98. Следующая серия асинхронных двигателей должна уже иметь вероятность безотказной работы, равной примерно 0,95 за 10 000 ч наработки.

Учитывая, что вероятность отказа витковой изоляции обмотки статора пропорциональна квадрату числа дефектов эмалевого покрытия, при разработке конструкции и технологии изготовления двигателя предусматриваются мероприятия по снижению числа дефектов на всех стадиях их образования. В технических условиях на эмалированные провода регламентируется начальная дефектность, что заставляет кабельные заводы улучшать качество покрытия. Снижается повреждаемость провода при статорообмоточных операциях, что достигается как улучшением механических свойств эмалевого покрытия, так и уменьшением усилий, воздействующих на провод при укладке его в пазы.

Большое внимание уделяется выбору целесообразного значения коэффициента заполнения паза. При повышении коэффициента заполнения увеличивается использование двигателя. С другой стороны, слишком большие коэффициенты заполнения приводят к увеличению усилий при укладке провода и, следовательно, к увеличению его повреждаемости.

Для уменьшения скорости дефектообразования при старении предусматриваются запасы температуры обмотки. Это достигается двумя путями: переходом на более нагревостойкий провод и интенсификацией охлаждения.

Наряду с предъявлением требований к отдельным компонентам системы изоляции и технологическим процессам изготовления обмотки должны быть предъявлены требования к системе изоляции в целом. Дело в том, что изготовление обмотки сопровождается протеканием химических реакций и окончательные свойства системы могут не являться простой линейной комбинацией исходных свойств компонентов. Для подтверждения интегральных свойств системы предлагаемые варианты композиций должны быть испытаны в условиях, имитирующих рабочие. В технические требования на систему изоляции вводится гамма-процентный ресурс, измеренный на условном объеме.

Зная объем изоляции в машине и требуемый гамма-процентный ресурс системы изоляции, мы легко можем перейти к гамма-процентному ресурсу на условном объеме.

Уменьшение вероятности отказа двигателя вследствие перегрузок может дать применение встроенной температурной защиты.

Глава двенадцатая

РАСЧЕТ ВИБРОШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

12-1. СТАНДАРТНЫЕ ВИБРОШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для описания акустического состояния механизмов существует несколько почти равноценных величин. В нашей стране в электромашиностроении в соответствии с рекомендациями СЭВ РС 1194-73 для оценки уровня шума в качестве нормируемой величины по ГОСТ 16372-77 принят средний уровень звука L_{d1A} на расстоянии $d=1$ м от контура машины при наличии звукоотражающего пола

$$L_{d1A} = 20 \lg \frac{p_{d1A}}{p_0}, \quad (12-1)$$

где p_{d1A} — среднеквадратичное значение звукового давления стационарного сигнала, Па, измеренное на расстоянии 1 м от контура машины с учетом «коррекции А» шумомера; $p_0=2 \cdot 10^{-5}$ — пороговое значение звукового давления.

Таблица 12-1

Частота, Гц	Номинальные значения затухания характеристики А, дБ	Допуски для прецизионного шумомера, дБ		Частота, Гц	Номинальные значения затухания характеристики А, дБ	Допуски для прецизионного шумомера, дБ	
31,5	—39,5	+3	—3	500	—3,2	+1	—1
63	—26,2	+3	—3	1000	0	+1	—1
125	—16,1	+1	—1	2000	+1,2	+1	—1
250	—8,6	+1	—1	4000	+1,0	+1	—1
				8000	—1,1	+1,5	—3

Коррекция А выражается в искусственном уменьшении давления (табл. 12-1) в измерительном тракте шумомера и необходима для получения одинакового звукового ощущения во всем диапазоне слышимых частот. При измерении шума микрофон устанавливают обычно в нескольких точках k на расстоянии 1 м от контура машины, не учитывая ее выступающих частей. Средний уровень звука вычисляется по формуле

$$L_{d1A} = 10 \lg \sum_{i=1}^k \cdot 10^{0,1L_{d1Ai}} - 10 \lg k, \quad (12-2)$$

где L_{d1Ai} — i -й из усредняемых уровней, дБ.

Если разность между наибольшим и наименьшим уровнями звука не превышает 5 дБ по шкале А, то средний уровень L_{d1A} приближенно равен среднему арифметическому значению всех уровней L_{d1Ai} :

$$L_{d1A} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k L_{d1Ai}. \quad (12-3)$$

Для машин, изготовляемых на экспорт, в качестве нормируемой величины принимается скорректированный уровень звуковой мощности L_{PA} . Скорректированный уровень звуковой мощности рассчитывается по формуле

$$L_{PA} = L_{d1A} + 10 \lg \frac{s}{s_0}, \quad (12-4)$$

где $s_0=1$ м², $s=2\pi r_s^2$ — площадь измерительной поверхности (эквивалентной полусферы), м²; r_s — эквивалентный радиус, м, по ГОСТ 11929-66.

Значения $10 \lg \frac{s}{s_0}$ по шкале А даны в табл. 12-2 для случаев, когда максимальный размер машины $l_{max} \leq 1$ м или $1 \text{ м} < l_{max} < 2$ м при отношении максимально-

Таблица 12-2

l_{max}	Более или равно	—	0,12	0,38	0,64	1,0	1,36	1,76
	Менее	0,12	0,38	0,64	1,0	1,36	1,76	2,0
$10 \lg \frac{s}{s_0}$, дБ		8	9	10	11	12	13	14

го и минимального размеров машины $l_{max}/l_{min} \leq 2$. Для остальных случаев значения $10 \lg \frac{s}{s_0}$ приведены в ГОСТ 16372-77.

В качестве нормируемого параметра вибрации, создаваемой электрической машиной, принимают наибольшее из эффективных значений вибрационной скорости $v_{эф, max}$, мм/с, измеренной в соответствии с ГОСТ 12379-75. При расчетах вибраций часто выражают результаты не по вибрационной скорости, а по вибрационному ускорению, в децибелах, относительно нулевого уровня $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с² по формуле

$$a_{дБ} = 20 \lg \frac{a}{a_0}, \quad (12.6)$$

где a — эффективное значение вибрационного ускорения м/с².

12.2. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ШУМОВ И ВИБРАЦИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Уровни шума и вибрации двигателей зависят от геометрии частей машины, магнитных и токовых нагрузок, конструкции оболочки, вентиляционных и подшипниковых узлов, точности обработки деталей, качества сборки и т. д. Очень часто шумы и вибрации машин обусловлены совокупностью многих факторов, и трудно выделить причины их возникновения. Однако для того, чтобы упростить их значение, расчет и исследование, принято условно разделять шумы в зависимости от источников на три группы: вентиляционные, механические и магнитные, а вибрации на две группы: механические и магнитные.

Вентиляционный шум вызывается турбулентностью потока охлаждающего газа. Интенсивность шума зависит от степени совершенства (в аэродинамическом отношении) вентилятора, вентиляционной сети машины и скорости охлаждающего газа. В некоторых случаях причиной вентиляционного шума может быть резонирование неудачно спроектированных тонкостенных деталей вентиляционной сети (кожуха вентиляторов, направляющих щитков, жалюзи и т. д.). Неправильный выбор соотношений числа лопаток вентилятора и числа входных и выходных вентиляционных отверстий в машинах

степенью защиты IP23 может привести к появлению тональных составляющих (явлению «сирены»).

Механические вибрации и шумы вызываются искажением формы движущихся контактирующих поверхностей (подшипников, уплотнений, щеток), неуравновешенностью вращающихся деталей и зависят от качества подшипников, точности изготовления и монтажа деталей подшипниковых узлов, точности уравнивания вращающихся деталей, а также от акустических свойств подшипниковых щитов, механических свойств лап и других деталей двигателя, которые могут резонировать под действием вибраций механического происхождения.

Причиной магнитных шумов и вибраций являются силы электромагнитного происхождения, действующие в воздушном зазоре машины. Эти силы имеют характер вращающихся или пульсирующих волн, деформирующих статор со станиной или вал и вызывающих шумы и вибрации на определенных частотах в диапазоне от 100 до 4000 Гц. Уровень магнитных шумов и вибраций зависит от конструкции активной части машины, неравномерности воздушного зазора, электромагнитных нагрузок, а также от конструктивных параметров и увеличивается с увеличением числа пар полюсов машины и возрастающей степени использования активных материалов.

12.3. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ ШУМ

а) Источники и частоты вентиляционного шума

Основными составляющими вентиляционного шума являются:

- 1) шум в широком диапазоне частот, обусловленный турбулентностью потока охлаждающего газа;
- 2) тональные звуки, вызванные периодическими колебаниями давления на отдельных участках вентиляционной сети, а также тональные звуки, возникающие при встрече воздушного потока с препятствиями в виде ребер, крепежных болтов и других выступающих частей;
- 3) тональные звуки или шум в широком диапазоне частот, обусловленный резонансом тонкостенных деталей вентиляционного узла.

Шум, вызванный турбулентностью потока охлаждающего газа, зависит от скорости газа (условно принимаемой равной окружной скорости наружной кромки

лопатки вентилятора) в шестой или пятой степени в зависимости от частоты вращения двигателя. Отсюда следует, что основную часть шума в машинах со степенью защиты IP44 и частотой вращения, равной или превосходящей 1500 об/мин, создает вентилятор. Например, при наружном диаметре лопаток вентиляторов выше 300 мм и частоте вращения 1500 об/мин уровни аэродинамических шумов превышают 75 дБ и являются преобладающими.

За последние годы проведены всесторонние исследования вентиляционного шума и опубликовано значительное количество работ [118]. Было исследовано влияние на аэродинамический шум, обусловленный турбулентностью потока, самых разнообразных конструкций как самих вентиляторов и их элементов, так и элементов вентиляционной системы: соотношения наружного и внутреннего диаметров лопаток вентиляторов, формы и геометрии лопаток, их числа, соотношения площадей входа и выхода потока, условия входа и выхода и т. д. Анализ результатов работ показывает, что решающим фактором в создании этого шума является наибольшая окружающая скорость вентиляционных лопаток. С точки зрения шумообразования конструктивные формы вентилятора имеют второстепенное значение, и их совершенствование может дать снижение шума примерно на 2 дБ [119]. Показано [120], что в вентиляторах с прямыми лопатками форма и угол наклона лопаток не влияют на шумообразование, и заметное снижение уровня шума (4—5 дБ) может дать только применение профильных лопаток. Хотя все исследователи отмечают, что снижение уровня аэродинамического шума удастся только за счет уменьшения наружного диаметра вентилятора, однако эта возможность ограничивается необходимостью интенсивного охлаждения двигателей.

Если перед вентилятором или сзади него имеются неподвижные препятствия в виде входных решеток, ребер станины или щита, крепящих болтов и других выступающих частей, то при прохождении кромки вентиляторных лопаток мимо этих препятствий в потоке воздуха возникают возмущения давления в виде импульсов, которые могут вызвать появление тональных звуков. Как показали многочисленные исследования, частота этих звуков равна:

$$f = nz_n k, \quad (12-6)$$

где n — частота вращения вентилятора, об/с; z_n — число лопаток вентилятора; $k=1, 2, 3, \dots$ — порядок гармонической.

Другой причиной появления тональных звуков могут быть препятствия на пути движения воздуха, выходящего из вентиляционного кожуха [121]. Возникающий шум при больших скоростях потока имеет характер свиста и очень неприятен. В случае препятствий сферической формы частота звука приблизительно определяется по формуле

$$f \approx 0,2 \frac{v_c}{D}, \quad (12-7)$$

где v_c — средняя скорость воздуха; D — диаметр препятствия.

Интенсивность тональных звуков, возникающих в электрических машинах, не поддается расчету и зависит от многих факторов: размеров и формы препятствий, искажающих поток; скорости потока; расстояния между кромками лопаток вентилятора и препятствиями; соотношения размеров межлопаточных каналов вентилятора и неподвижных препятствий и т. д.

В тихоходных машинах малой и средней мощности с частотой вращения 1000 об/мин и ниже аэродинамический шум невелик, и его можно не принимать во внимание. Однако если вентиляционный узел этих машин имеет связанные со станиной и щитами тонкостенные детали, то последние могут резонировать и усиливать шум магнитного или механического происхождения почти на любой частоте. По целому ряду причин расчет шума при резонансе тонкостенных оболочек — задача пока не решенная, однако можно экспериментально оценить это явление количественно и качественно.

В [123] показано, что увеличение общего уровня шума при резонансе стального штампованного кожуха двигателей с частотой вращения 1000 об/мин и ниже и степенью защиты IP44 в ряде случаев достигает 10 дБ и более. При объеме выборки, равном 75 двигателям серии 4А с высотами оси вращения 160—250 мм, среднее увеличение общего уровня составило 4,5 дБ при среднем квадратическом отклонении 3 дБ. Повышение уровня шума имело место в диапазоне частот 350—10 000 Гц. Замечено также, что увеличить общий уровень шума на 5 дБ может и вентилятор, если он изго-

товлен из материала с малым внутренним демпфированием, например из алюминиевого сплава. В этом случае он работает как акустический излучатель шумов, создаваемых подшипниками.

Таким образом, вентиляционный узел является источником шума не только в быстроходных, но и в тихоходных машинах, и на это обстоятельство следует обращать внимание, особенно при проектировании электродвигателей с пониженным уровнем шума.

б) Приближенные методы расчета вентиляционного шума

В последние годы неоднократно предпринимались попытки связать с приемлемой для практических случаев точностью уровень вентиляционных шумов электрических машин с их конструкцией. Однако соотношения размеров и конструкции вентиляторов, встраиваемых в машины, настолько разнообразны, а разброс опытных данных настолько велик, что до сих пор такие зависимости теоретически не установлены. В основу расчетов вентиляционных шумов поэтому были положены эмпирические формулы, позволяющие приближенно определить уровень аэродинамического шума (без явно выраженных тональных составляющих) по заданным размерам вентиляторов, или исходя из законов акустического и аэродинамического подобия, или по мощности и частоте вращения самой машины и результатам обработки большого количества экспериментальных данных.

В частности, Э. А. Городецким [124, 125] были проведены многочисленные опыты на специальной установке, полностью имитирующей условия работы вентиляторов в электрических машинах и исключающей все посторонние источники шума. Конструкция установки позволяла менять вентиляторы, сопротивления участков вентиляционной сети и производить требуемые аэродинамические измерения. Используя результаты экспериментальных и теоретических исследований, приведенные в [126], а также полученные на установке данные для машин со степенью защиты IP44 и центробежным вентилятором была выведена формула для расчета общего уровня аэродинамического шума:

$$L_{dA} = 60 \lg u_2 + 10 \lg D_2 b + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 - \xi_0; \quad (12-10)$$

здесь u_2 — окружная скорость наружных кромок лопаток вентилятора; D_2 — наружный диаметр лопаток вентилятора; b — ширина лопаток вентилятора; k_1 — коэффициент, зависящий от расстояния, для которого рассчитывается уровень шума (для расстояния 0,5 м $k_1=5$ дБ, для 1 м $k_1=0$); k_2 — коэффициент, зависящий от относительного расхода воздуха $\bar{Q}_{p*}$ (рис. 12-1),

$$\bar{Q}_{p*} = Q_p / Q_{max},$$

где Q_p — рабочий расход воздуха в машине; Q_{max} — максимальный расход воздуха, если Q_{p*} неизвестно, то для машин со степенью защиты IP44 его можно принять

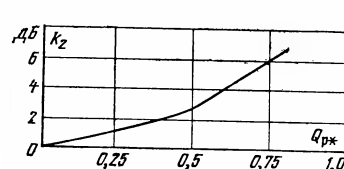


Рис. 12-1. Зависимость $k_2 = f(Q_p)$.

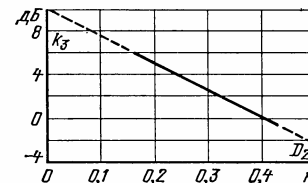


Рис. 12-2. Зависимость $k_3 = f(D_2)$.

равным 0,5—0,7; k_3 — коэффициент, зависящий от диаметра вентилятора D_2 (рис. 12-2); k_4 — коэффициент, зависящий от угла атаки — разности угла входа лопатки и угла входа потока (рис. 12-3); k_5 — коэффициент, зависящий от угла наклона лопатки на выходе (рис. 12-4); ξ_0 — величина, характеризующая ослабление шума за счет кожуха. Для машин с наружным обдувом $\xi_0 = 4 \pm 2$ дБ.

Формула (12-8) применима при окружных скоростях $u_2 = 15 \div 100$ м/с, наружном диаметре вентилятора $D_2 \leq 0,5$ м, ширине лопаток $b = 0,1 \div 0,35 D_2$, причем расстояние от кромок лопатки вентилятора до любого неподвижного препятствия в направлении основного движения потока воздуха должно быть не менее $0,1 D_2$.

При определении уровня звука для двигателей со степенью защиты IP44 с наружным обдувом и реверсивным вентилятором формула (12-8) упрощается:

$$L_{dA} = 60 \lg u_2 + 10 \lg D_2 b - 25 D_2 + 10. \quad (12-9)$$

Необходимо отметить, что, хотя все коэффициенты, входящие в (12-8), получены экспериментальным пу-

тем для определенных типов вентиляторов (рис. 12-5), в случае применения других вентиляторов (см. рис. 8-15 и 8-16) расхождения между опытными данными и расчетом не превышают 4 дБ.

Уровень аэродинамического шума двигателей со степенью защиты IP44 приближенно может быть также рассчитан по следующей формуле [127]:

$$L_{d1A} = 142 + 20 \lg D_2 + 50 \lg \frac{u_2}{340}. \quad (12-10)$$

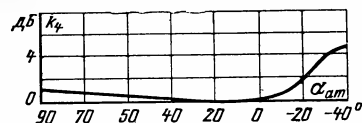


Рис. 12-3. Зависимость $k_4 = f(\alpha_{ат})$.

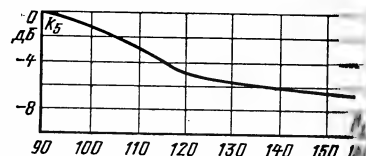


Рис. 12-4. Зависимость коэффициента $k_5 = f(\beta_2)$.

В табл. 12-3 приведены опытные данные и результаты расчетов уровней шума по (12-9) и (12-10) электродвигателей серии 4А.

Таблица 12-3

Частота вращения, об/мин	Высота оси вращения, мм	Окружная скорость наружных кромок лопаток вентилятора u_2 , м/с	Наружный диаметр лопаток вентилятора D_2 , м	Ширина лопатки вентилятора b , м	Уровень аэродинамического шума, дБ		
					Опыт	Расчет по формуле	
						(12-9)	(12-10)
3000	160	40,8	0,260	0,06	80,5	82,0	84,5
	180	46,4	0,295	0,065	84,5	85,4	87,9
	200	50,2	0,320	0,069	84,5	87,4	90,5
	225	57,3	0,365	0,07	88,5	90,6	94,5
	250	64,1	0,408	0,079	91	93,1	98
1500	160	23,2	0,295	0,075	71,5	68	73
	180	25,9	0,33	0,084	74,5	71	76,4
	200	28,9	0,368	0,100	77,5	74	80
	225	32,2	0,41	0,104	79,0	76,5	83,0
	250	36	0,46	0,108	82,0	79	86,5

Уровень вентиляционного шума электродвигателей серии 4А со степенью защиты IP23 и радиальной системой вентиляции можно приближенно оценить по формуле

$$L_{d1A} = 60 \lg n + 80 \lg h - (C_1 + C_2 h), \quad (12-11)$$

где h — высота оси вращения, м; n — частота вращения, об/мин.

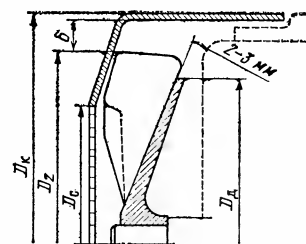


Рис. 12-5. Схема вентиляционного узла.

При $n=3000$ об/мин $C_1=70$, $C_2=25$. При $n=1500$ об/мин $C_1=54$, $C_2=40$.

В табл. 12-4 приведены результаты расчетов уровней шума по (12-11) и сравнение их с опытными данными.

При проектировании серии машин со степенью защиты IP44 и с подобными вентиляционными системами уровень вентиляционного шума электродвигателей можно приближенно оценить по данным акустических испытаний опытных образцов одного типоразмера [128]:

$$L_{d1A} = 50 \lg \left(\frac{n}{n_0} \right) + 70 \lg \left(\frac{D_2}{D_{20}} \right) + L_{d1A0}, \quad (12-12)$$

где n_0 и D_{20} — частота вращения и наружный диаметр вентилятора опытного образца; L_{d1A0} — измеренный

Таблица 12-4

Высота оси вращения h , мм	Уровень вентиляционного шума, дБ			
	$2p=2$		$2p=4$	
	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
160	72	70,9	71	66,5
180	73	74,5	72	69,8
200	76	78	73	72,7
225	81	81,2	76	75,8
250	86	84,1	78	78,4

уровень шума испытанного образца; n и D_2 — частота вращения и наружный диаметр вентилятора машины, шум которой требуется определить.

Формула дает хорошее совпадение с опытом при окр. скоростях наружных кромок лопаток вентилятора не более 65 м/с.

в) Рекомендации по снижению уровня вентиляционного шума

Основные рекомендации по снижению уровня вентиляционного шума машин общего назначения [110, 130]:

1. Для асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 и наружным обдувом предпочтительно применение вентиляторов с коническим диском и с минимально возможной по условиям прочности и технологии изготовления толщиной лопаток. Поверхности вентилятора и кожуха должны быть гладкими для уменьшения потерь напора на трение.

2. Максимально допустимый наружный диаметр вентилятора исходя из требуемого уровня вентиляционного шума может быть определен по (12-9) для двухполюсных машин и по (12-10) для четырехполюсных в зависимости от отношения ширины лопатки вентилятора к его наружному диаметру и частоты вращения. При этом значение D_2 должно быть минимально допустимым по условиям охлаждения.

3. Отношение диаметров вентилятора D_1'/D_2 (рис. 12-6) следует выбирать примерно равным или несколько большим 1,35 (проверено для $D_2 = 0,15 \div 0,25$ м). При этом значение D_1' должно быть минимально возможным.

4. Угол наклона конической поверхности несущего диска вентилятора α_1 (рис. 12-6) должен быть равен 35—25°. Меньшее из указанных значений относится к частоте вращения 3000 об/мин.

5. Касательная к образующей конусной поверхности диска вентилятора должна проходить на расстоянии не менее 2—3 мм от подшипникового щита двигателя (см. рис. 12-5). При меньших значениях этого зазора в спектре вентиляционного шума может появиться тональная составляющая на частоте, определяемой по (12-6). С этой же целью наружный диаметр несущего

диска вентилятора D_d должен быть равен 1,1—1,4 частоты оси вращения двигателя.

6. Для исключения возможности появления тональной составляющей в спектре вентиляционного шума необходимо, чтобы зазор между наружными кромками лопаток вентилятора и неподвижными препятствиями в направлении основного движения потока был не менее 0,1 D_2 . При этом особенно заметное влияние на увеличение уровня шума оказывают препятствия, поперечное сечение которых соизмеримо с сечением межлопаточного канала на выходе потока. В этой связи желательно, чтобы зазор δ (см. рис. 12-5) между наружным диаметром вентилятора и внутренним диаметром цилиндрической части кожуха был не менее указанного выше значения.

7. Ширина лопаток вентилятора b должна быть равной 0,15—0,3 D_2 . Предпочтительны меньшие значения.

8. Число радиальных лопаток вентилятора z_d с акустической точки зрения желательно выбрать минимальным, однако для того, чтобы не ухудшить аэродинамические свойства вентилятора, можно руководствоваться соотношением

$$z_d = \pi (D_{1cp} + D_2) / 2h_n, \quad (12-13)$$

где $D_{1cp} = (D_1' + D_1'') / 2$; $h_n = (D_2 - D_{1cp}) / 2$.

9. Диаметр входного отверстия в кожухе $D_{сет}$ для реверсивных машин (см. рис. 8-15, 8-16) предпочтительно выбирать равным 0,75—0,9 D_2 . Однако во всех случаях он должен быть меньше наружного диаметра станины двигателя (без учета ребер). Как правило, значение $D_{сет}$ следует в дальнейшем уточнять экспериментально. Входная решетка должна иметь минимальное аэродинамическое сопротивление. Желательно применение вместо стальных штампованных решеток металлических сеток.

10. Для исключения резонансов у машин с низким уровнем аэродинамического шума кожух вентилятора желательно изготавливать литым из чугуна или пластмассовым. Возможно применение комбинированных

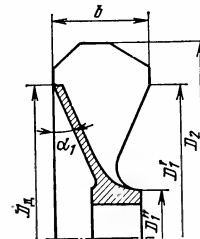


Рис. 12-6. К определению основных размеров вентилятора.

кожухов, цилиндрическая часть которых отливается заодно со щитом, а коническая изготавливается методом глубокой вытяжки. В случае применения стальных штампованных кожухов они по возможности должны удовлетворять следующим требованиям [131]:

состоять из двух отдельных частей: цилиндрической, укрепляемой на подшипниковом щите, и конической; между примыкающими друг к другу кромками частей кожуха необходимо устанавливать демпфирующую прокладку;

место соединения двух частей кожуха должно находиться на минимальном расстоянии от места крепления кожуха к щиту;

количество точек соединения частей кожуха между собой должно быть минимальным;

примыкающие друг к другу кромки частей кожуха не должны иметь фланцев и изгибов, придающих им жесткость.

11. В тихоходных электродвигателях со степенью защиты IP44 и подшипниками качения желательно применять пластмассовые вентиляторы.

В случае, если к машинам предъявляются особые требования по уровню шумов, необходимо воспользоваться более радикальными способами снижения вентиляционного шума [132], из которых следует отметить следующие:

1. Применение независимой вентиляции. Этот способ особенно приемлем для электродвигателей с регулируемой в широком диапазоне частотой вращения, а также для электродвигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах. Необходимо отметить, что независимый вентилятор выполняется нереверсивным с профильными лопатками, что, как правило, препятствует образованию тональных шумов. Мощность, потребляемая вентилятором, обычно меньше мощности, потребляемой вентилятором, непосредственно встраиваемым в машину.

2. Применение в машинах узкоспециализированного исполнения (например, лифтовых) со степенью защиты IP23 и радиальной системой вентиляции двух уменьшенных вентиляторов вместо одного большого. При этом наружный диаметр вентилятора может быть уменьшен в 2 раза, а уровень вентиляционного шума снижен на 5—7 дБ.

3. Применение электродвигателей с замкнутой системой водяного охлаждения. Этот способ позволяет снизить общий уровень шума на 10—15 дБ.

При разработке машин с особо жесткими требованиями к уровню шума возможен отказ от принудительной вентиляции и переход к естественному охлаждению. При этом вентиляционная составляющая исключается полностью. Однако этот способ требует снижения номинальной мощности в 3—5 раз.

Хороший эффект дает применение звукопоглощающих покрытий для отдельных участков вентиляционной сети [120]. В качестве звукопоглощающих материалов могут быть использованы стеклянное волокно, синтетические материалы (поролон, пенополиуретан), перфорированные пластины, природное волокно. Уменьшение уровня вентиляционного шума (эффективность звукопоглощения) определяется по формуле

$$\Delta L = nk + \alpha \frac{U}{s} l, \quad (12-14)$$

где n — число стенок, перпендикулярных к направлению распространения основной звуковой волны от источника до выхода из машины; k — степень демпфирования звуковой волны, соответствующая ее отклонению на 90°; α — коэффициент поглощения звука соответствующего покрытия; U — средний периметр канала; s — среднее поперечное сечение канала; l — длина канала.

Коэффициент α для кожухов толщиной 2—5 мм, выполненных из тонкой жести, покрытой асбестом или пенопластом с отверстиями, равен примерно 0,65 (определен экспериментально). Возможное значение k при этом равно 3—5.

Следует отметить, что применение звукопоглощающих покрытий может быть предусмотрено или при проектировании, или на уже готовой машине. В последнем случае к машинам пристраиваются специально разработанные глушители, конструкция которых должна удовлетворять следующим требованиям:

глушитель должен иметь спиральную форму и являться естественным продолжением выходного канала; глушитель должен иметь внутренние перегородки (в двух перпендикулярных направлениях) для увеличения поверхности поглощения;

площадь поперечного сечения глушителя должна возрастать по его длине для замедления потока воздуха, выходящего из него;

выходное отверстие глушителя должно быть защищено экраном;

глушитель должен устанавливаться на машине простым и удобным способом.

12-4. ШУМ И ВИБРАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

а) Нормы неуравновешенности вращающихся частей. Расчеты вибрации, обусловленной неуравновешенностью

Мерой неуравновешенности Δ вращающихся частей двигателя служит произведение массы уравнивающего груза в граммах на радиус установки груза в миллиметрах. Для сравнительной оценки роторов различной массы вводится понятие удельной неуравновешенности. Она равна неуравновешенности в грамм-миллиметрах, деленной на массу ротора m_p в килограммах

$$e = \Delta / m_p. \quad (12-15)$$

Удельная неуравновешенность e имеет размерности длины и выражается в микрометрах. При чисто статической неуравновешенности удельная неуравновешенность соответствует смещению центра тяжести ротора от оси вращения.

Наличие неуравновешенности во вращающемся роторе может привести к появлению недопустимых вибраций, преждевременному разрушению подшипниковых узлов и снижению точности механизмов, приводимых в действие электродвигателями. С другой стороны, в реальных машинах полностью устранить неуравновешенность невозможно, в связи с чем возникает вопрос об установлении допустимых значений остаточной неуравновешенности. При этом необходимо принимать во внимание технические требования, предъявляемые к электродвигателям, возможности производства и экономические соображения [133]. В настоящее время на основе накопленного опыта и проведенных исследований допустимые удельные остаточные неуравновешенности в зависимости от массы ротора установлены ГОСТ 12327-66. Для электрических машин общего на-

значения с обычными требованиями по уровню вибрации достаточно уравнивания по второму классу точности. Для машин с особыми требованиями по уровню вибрации рекомендуется уравнивание по первому классу точности. Уравнивание по нулевому классу точности необходимо для электрических машин с особыми жесткими требованиями по уровню вибрации.

Для асинхронных двигателей с симметрично расположенными относительно центра тяжести плоскостями исправления допустимые остаточные неуравновешенности в плоскостях исправления $I(\Delta_1)$ и $II(\Delta_2)$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 0,5 m_p e.$$

Допустимую остаточную неуравновешенность $\Delta_{\text{доп}}$ стали массой $m_{\text{дет}}$, устанавливаемой на отбалансированный ротор, определяют по формуле

$$\Delta_{\text{доп}} = m_{\text{дет}} e. \quad (12-16)$$

При этом значение $\Delta_{\text{доп}}$ следует принимать равным не менее 0,2 меньшей из допустимых остаточных неуравновешенностей в плоскостях исправления ротора.

Вибрации, обусловленные неуравновешенностью, могут быть вычислены следующим образом.

Если электрическую машину, установленную (подвешенную) на упругом элементе, рассматривать как однородное тело, то дифференциальное уравнение, описывающее собственные колебания машины в вертикальном направлении, имеет вид:

$$m_d \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0, \quad (12-17)$$

где m_d — масса двигателя; k — жесткость упругого элемента.

Отсюда собственная круговая частота этой системы

$$\omega_0 = \sqrt{k/m_d}. \quad (12-18)$$

При вращении ротора со статическим небалансом и угловой частотой $\omega = 2\pi n/60$ возникает центробежная сила

$$F = m_p e \omega^2. \quad (12-19)$$

Вертикальная составляющая центробежной возмущающей силы

$$F_v = m_p e \omega^2 \sin \omega t \quad (12-20)$$

и дифференциальное уравнение движения

$$m_d \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = m_p e \omega^2 \sin \omega t, \quad (12-21)$$

откуда вертикальная составляющая смещения машины относительно центра тяжести

$$x = \frac{\omega^2 / \omega_0^2}{1 - \omega^2 / \omega_0^2} \frac{m_p e}{m_d} \sin \omega t. \quad (12-22)$$

Жесткость упругого элемента, на котором установлена машина, в соответствии с ГОСТ 12379-75 должна быть такой, чтобы собственная частота колебаний машины не превышала 0,25 наименьшей частоты вращения, т. е. практически была бы не более 3 Гц. При этом формула (12-22) упрощается:

$$x = \frac{m_p e}{m_d} \sin \omega t. \quad (12-23)$$

Продифференцировав (12-23), найдем эффективное значение вибрационной скорости, мм/с, в любой точке на поверхности машины:

$$v_{\text{эф,н}}^{\text{ст}} = \frac{m_p e \omega}{\sqrt{2} m_d} \cdot 10^{-3}. \quad (12-24)$$

При чисто динамическом небалансе дифференциальное уравнение, описывающее повороты машины в вертикальной плоскости относительно оси, перпендикулярной оси вращения ротора, имеет вид:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_b \sin \omega t, \quad (12-25)$$

где J — момент инерции машины относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести машины и перпендикулярной оси вращения ротора; M_b — возбуждающий момент.

Возбуждающий момент, обусловленный центробежными силами в симметричной относительно центра тяжести машине, определяется по формуле

$$M_b = \frac{e m_p \omega^2}{2} l, \quad (12-26)$$

где l — расстояние между балансировочными плоскостями.

Ввиду малости угла поворота амплитуда перемещения точек машины, лежащих в плоскости щитов,

$$x = \frac{e m_p}{4J} l L_1; \quad (12-27)$$

где L_1 — расстояние между подшипниками.

Эффективное значение вибрационной скорости, мм/с,

$$v_{\text{эф,н}}^{\text{д}} = \frac{e m_p \omega}{4 \sqrt{2} J} l L_1 \cdot 10^{-3}. \quad (12-28)$$

Следует отметить, что точное аналитическое определение момента инерции машины требует много времени, а экспериментальное — специального оборудования. В связи с этим момент инерции, кг·м², определяют приближенно, заменив машину однородным цилиндром массой m_d , кг, длиной L , см, и диаметром, равным внешнему диаметру сердечника статора D_{a1} , см:

$$J \approx m_d (0,0833 L^2 + 0,0625 D_{a1}^2). \quad (12-29)$$

В случае смешанного небаланса эффективное значение вибрационной скорости при заданной удельной остаточной неуравновешенности не превышает эффективного значения вибрационной скорости машины, ротор которой имеет чисто статическую или чисто динамическую неуравновешенность, поэтому на практике можно ограничиться рассмотрением этих крайних случаев.

Обратная задача — нахождение допустимой удельной остаточной неуравновешенности по заданному значению вибрационной скорости — легко решается с учетом следующих соображений. Общий уровень вибрационной скорости электродвигателя определяется по формуле

$$v_{\text{эф}} = \sqrt{v_{\text{эф,н}}^2 + v_{\text{эф,м}}^2 + v_{\text{эф,п}}^2} \quad (12-30)$$

где $V_{\text{эф,н}}$, $V_{\text{эф,м}}$, $V_{\text{эф,п}}$ — составляющие вибрационной скорости, обусловленной соответственно небалансом, магнитными силами в воздушном зазоре и подшипниками.

Анализ составляющих вибрации для электродвигателей различных типоразмеров показывает, что, исходя из (12-30), сугубо приближенно можно записать:

$$v_{\text{эф,н}} = v_{\text{эф}} / \sqrt{3}. \quad (12-31)$$

На практике вибрационная скорость, обусловленная небалансом, должна быть несколько меньше (примерно на 20—25%), так как балансировочные станки имеют сравнительно малую точность и, кроме того, необходимо учитывать, что роторы в большинстве случаев при балансировке устанавливаются на шейках вала и после монтажа подшипников остаточная неуравновешенность может увеличиваться из-за разнотолщинности внутреннего кольца подшипника. Часто на отбалансированные роторы устанавливают вентиляторы, которые также увеличивают остаточную неуравновешенность.

Таким образом, с учетом вышеизложенного

$$v_{\text{эф,н}} \leq 0,8 v_{\text{эф}} / \sqrt{3}. \quad (12-32)$$

Подставляя в неравенство (12-32) значение вибрационной скорости при статическом (12-24) и динамическом (12-28) небалансах, окончательно имеем:

$$e_{\text{доп,ст}} \leq \frac{6000}{n} \frac{m_d}{m_p} v_{\text{эф}}; \quad (12-33)$$

$$e_{\text{доп,дин}} \leq \frac{2500}{n} \frac{m_d}{m_p} v_{\text{эф}} \frac{0,0833L^2 + 0,0625D_{a1}^2}{lL_1}. \quad (12-34)$$

Следует отметить, что в большинстве случаев удельная остаточная неуравновешенность при статическом небалансе близка к допустимой остаточной неуравновешенности при динамическом небалансе. Однако отношение расстояния между балансировочными плоскостями l к расстоянию между подшипниками L_1 увеличивается, то допустимая неуравновешенность при динамическом небалансе уменьшается. Последнее особенно характерно для электродвигателей, у которых балансировочные плоскости вынесены на специальные диски, расположенные в непосредственной близости от подшипников. На это обстоятельство следует обращать внимание при выборе допустимой остаточной неуравновешенности высокоточных машин, у которых предусмотрена балансировка в сборе, так как плоскости исправления у этих машин расположены за опорами и расстояние между ними больше, чем расстояние между подшипниками.

б) Расчет вибрации, создаваемой подшипниками

В настоящее время в электрических машинах, как правило, применяются подшипники качения. Неизбежные отклонения в пределах допусков, размеров и формы деталей подшипников (тел качения, сепараторов, колец и канавок), а также особенности микрогеометрии этих

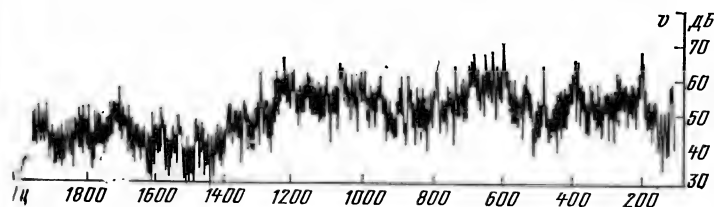


Рис. 12-7. Спектр вибрационной скорости, создаваемой подшипниками.

деталей являются причинами шумов и вибраций, иногда значительных.

На рис. 12-7 показан типичный спектр вибрации, создаваемый подшипниками типа 6317 в двигателе А250М2. Частоты отдельных гармонических этого спектра, вызванные наиболее существенными отклонениями геометрии подшипника, можно рассчитать по следующим формулам [119, 132]:

при разнотолщинности внутренней обоймы подшипника, радиальном биении наружных колец, а также боковом биении торцов внутренних и наружных колец подшипников возникают вибрации на частоте вращения

$$f = n/60; \quad (12-35)$$

при овальности колец — на двойной частоте вращения

$$f = 2n/60; \quad (12-36)$$

при овальности и гранности тел качения

$$f = \frac{D_0}{D_\omega} \left(1 - \frac{D_\omega^2}{D_0^2} \right) \frac{z}{2} \frac{n}{60} k_1; \quad (12-37)$$

при волнистости дорожек качения

$$f = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{D_\omega}{D_0} \right) \frac{n}{60} k_2; \quad (12-38)$$

при местном бринелировании дорожек качения

$$f = \frac{z}{2} \left(1 \pm \frac{D_\omega}{D_0} \right) \frac{n}{60} k_3, \quad (12-39)$$

причем в (12-38), (12-39) знак плюс принимается при наличии дефектов на внешнем кольце, знак минус при наличии дефектов на внутреннем кольце.

В формулах (12-35)—(12-39) приняты обозначения: n — частота вращения двигателя, об/мин; D_ω — диаметр тел качения, мм; D_0 — диаметр расположения центров тел качения, мм; z — число тел качения; k_1 — число граней на теле качения; k_2 — число волнистостей по окружности дорожки качения внутренней или наружной обоймы; k_3 — число дефектов на внутренней или наружной дорожке качения.

Следует отметить, что указанные частоты в большинстве случаев трудно обнаружить в спектрах вибрации электрических машин. Количественная оценка вибрации весьма затруднительна из-за случайного характера микрогеометрии подшипника, которая приводит на однотипных машинах к разбросу общего уровня вибрационной скорости до 10—25 дБ [134]. Кроме того, отклонения форм деталей подшипников возникают и при установке подшипников на машину вследствие различного рода перекосов и натягов. Вибрации подшипников могут также усиливаться из-за резонансов деталей машины: подшипниковых щитов, пружин, создающих осевое нажатие, валов, лап, что проявляется в повышении уровня вибрационной скорости на отдельных участках спектра (рис. 12-7).

Тем не менее уровень вибрации может быть приближенно рассчитан с использованием экспериментальных данных. Такой расчет, отличающийся простотой и дающий удовлетворительные результаты, был предложен Е. М. Коварским [135]. В соответствии с этой методикой эффективное значение радиальной вибрационной скорости на частоте вращения (12-35) от перемещения осей шеек вала в опорах, мм/с, в случае, если эти перемещения в обоих опорах совпадают по фазе (статический случай),

$$v_{эф,п1}^{ст} = a_1 \frac{\omega}{\sqrt{2}} \frac{m_p}{m_{ст,щ}} k_{дин1} \cdot 10^{-3}, \quad (12-40)$$

где $m_{ст,щ}$ — масса статора (со станиной) и щитов; a_1 — вертикальное перемещение оси шеек вала в опорах, мкм; $k_{дин1}$ — коэффициент динамического усиления вибрации.

Вертикальное перемещение a_1 имеет место только в электрических машинах с горизонтальным положением вала. При уравнивании на станках роторов без подшипников с последующей их насадкой

$$a_1 = 0,5\Delta_{р,б,в} + 0,16 \sqrt{\frac{\delta}{D_\omega} (\Delta_{т,в,к}^2 + \Delta_{т,в}^2)}; \quad (12-41)$$

здесь $\Delta_{р,б,в}$ — допуск на радиальное биение внутреннего кольца подшипника, мкм; δ — радиальный зазор подшипника, мкм; $\Delta_{т,в,к}$ — торцевое биение беговой дорожки внутреннего кольца, мкм; $\Delta_{т,в}$ — торцевое биение опорных запяточников вала, мкм.

Коэффициент динамического усиления вибрации равен:

$$k_{дин1} = \frac{1}{1 + m_p/m_{ст,щ} - (f/F_p)^2}, \quad (12-42)$$

где f — частота вибрации; F_p — собственная частота ротора,

$$F_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_\Sigma m_p}}; \quad (12-43)$$

здесь C_Σ — суммарная податливость вала, подшипников и опор.

Коэффициент $k_{дин1}$ определить теоретически очень трудно. Обычно его находят экспериментально. Для машин, у которых в процессе работы вал ротора не имеет изгиба (машины с жесткими роторами),

$$k_{дин1} = \frac{1}{1 + m_p/m_{ст,щ}}. \quad (12-44)$$

Если перемещения осей шеек вала в опорах находятся в противофазе друг с другом (динамический случай), радиальная вибрация может быть приближенно найдена по формуле

$$v_{эф,п1}^{дин} \approx v_{эф,п1}^{ст} (l_2/L_1)^2, \quad (12-45)$$

где l_2 — длина сердечника ротора.

Вибрация с двойной частотой вращения (12-36) вычисляется по формуле

$$v_{эф,п2} = 2a_2 \frac{\omega}{\sqrt{2}} \frac{m_p}{m_{ст,щ}} k_{дин2} \cdot 10^{-3}. \quad (12-46)$$

Овальность беговой дорожки внутреннего кольца a зависит от овальности шейки вала, натяга внутреннего кольца, его разнотолщинности. Приближенно

$$a_2 \approx 0,35\Delta_{o,ц}, \quad (12-47)$$

где $\Delta_{o,ц}$ — допуск на овальность цапфы, мкм.

Коэффициент динамического усиления вибрации $k_{дин2}$ в большинстве случаев можно принять равным единице.

Осевая вибрация на частоте вращения (12-35)

$$v_{эф,п,ос1} = a_{ос1} \frac{\omega}{\sqrt{2}} \frac{m_p}{m_{ст,ш}} k_{дин,ос1} \cdot 10^{-3}. \quad (12-48)$$

Осевое перемещение оси равно меньшей из двух величин: торцевого биения беговой дорожки внутреннего кольца $\Delta_{т,в\Sigma}$ и торцевого биения беговой дорожки наружного кольца $\Delta_{т,н\Sigma}$:

$$\Delta_{т,в\Sigma} = 0,6 \sqrt{\Delta_{т,в,к}^2 + \Delta_{т,в}^2 + \left(D_0 \frac{\Delta_{к,в}}{L_1}\right)^2}; \quad (12-49)$$

$$\Delta_{т,н\Sigma} = 0,6 \sqrt{\Delta_{т,н,к}^2 + \Delta_{т,г,к}^2 + \left(D_0 \frac{\Delta_{р,г}}{L_1}\right)^2}; \quad (12-50)$$

здесь $\Delta_{к,в}$ — допустимое радиальное биение шейки вала, мкм; $\Delta_{р,г}$ — радиальное смещение осей гнезд в шитах, мкм; $\Delta_{т,н,к}$ — допуск на торцевое биение наружного кольца подшипника, мкм; $\Delta_{т,г,к}$ — допуск на торцевое биение упорных поверхностей гнезд, мкм.

Допуски на торцевые биения наружного кольца подшипников, упорных поверхностей посадочных мест, биения дорожек и заплечиков вала, могут быть взяты по ГОСТ 520-71, 3325-55, 10356-63, а также из справочной литературы по подшипникам. Осевая вибрация на данной частоте вращения

$$v_{эф,п,ос2} = 2a_{ос2} \frac{\omega}{\sqrt{2}} \frac{m_p}{m_{ст,ш}} k_{дин,ос2}, \quad (12-51)$$

где $a_{ос2}$ — осевое перемещение цапфы в шарикоподшипнике, мкм, $a_{ос2} = 3a_2 \sqrt{D_{\omega}/\delta}$, но не более $0,25 \Delta_{т,н\Sigma}$.

Коэффициент динамичности также может быть принят равным единице. Вибрация с частотой от тройной

частоты вращения до 2000 Гц может быть вычислена по формуле

$$v_{эф,п3} = v_{п25} \frac{f}{25} \frac{m_p}{m_{ст,ш}} k_{дин,н}, \quad (12-52)$$

где $v_{п25}$ — эффективное значение радиальной вибрационной скорости, измеренной по методике ВНИИПП при частоте вращения двигателя 1500 об/мин и совместном действии радиальной и осевой нагрузок. Значения

Таблица 12-5

Внутренний диаметр подшипника, мм	$v_{п25}$, мм/с			
	Класс точности подшипника			
	0	6	6Ш	5Ш
До 30	0,25	0,12	0,10	0,06
До 50	0,30	0,15	0,12	0,08
До 80	0,35	0,18	0,14	0,10
До 120	0,40	0,20	0,16	0,12

$v_{п25}$ для некоторых типов шарикоподшипников приведены в табл. 12-5. Для роликоподшипников эти значения должны быть удвоены; f — частота вращения (12-35); $k_{дин,н}$ — коэффициент усиления вибрации, отражающий конструктивное совершенство машины. Значение $k_{дин,н}$ предварительно может быть взято из испытаний конструкций, близких к проектируемой. Для асинхронных двигателей общего назначения мощностью от 1 до 200 кВт при расчете радиальной вибрации $k_{дин,н} = 10 \div 13$ и при расчете осевой вибрации $k_{дин,н} = 18 \div 22$.

в) Рекомендации по снижению уровня шума и вибраций механического происхождения

Как отмечалось выше, шум и вибрация, создаваемые подшипниковыми узлами в электрических машинах, зависят от конструкции подшипника и качества его изготовления, от точности изготовления сопряженных с подшипником деталей и конструкций подшипникового узла, от условий работы подшипников. В соответствии с этим для снижения подшипниковых вибраций необходимо обеспечить правильный выбор подшипника, конструкцию и монтаж подшипникового узла, а также наиболее благоприятные режимы работы подшипников.

В ряде случаев может оказаться целесообразной замена подшипников качения на подшипники скольжения. При этом уровень подшипниковой составляющей шума может быть снижен на 20 дБ, а уровень вибрации уменьшен в 5 раз и более.

При выборе подшипников качения следует учитывать следующее:

1. Шариковые подшипники по сравнению с роликовыми имеют меньшие уровни шумов и вибрации и менее чувствительны к несоосности деталей подшипниковых узлов, возникающих из-за наличия технологических допусков.

2. Уровни шумов и вибраций подшипников возрастают с увеличением их диаметра и диаметра тел качения. Диаметр подшипника следует выбирать минимально допустимым из условий долговечности. Желательно применение подшипников легких серий. Если подшипники в машине имеют значительно отличающиеся нагрузки то целесообразна разунификация подшипников.

3. Меньшие уровни шумов и вибраций имеют шарикоподшипники более высоких классов точности. Для машин основного исполнения серии, относящихся к первому классу шума по ГОСТ 16372-77, применяются преимущественно подшипники шестого класса точности с нормальными радиальными зазорами. Для малошумных машин следует применять подшипники с минимальными значениями волнистости и гранности беговых дорожек и тел качения (изготавливаются по специальным техническим условиям).

При конструировании подшипниковых узлов необходимо принимать во внимание:

1. Подшипники монтируются на валу с посадками по системе отверстий, а в подшипниковом щите — по системе вала.

2. Наиболее благоприятными посадками подшипников качения являются плотная посадка внутреннего кольца на вал и скользящая посадка с гарантированным зазором наружного кольца в подшипниковый щит. Избежание провертывания наружное кольцо может способствовать порче.

3. Чистота посадочных поверхностей, отклонения от геометрической формы (овальность, конусность) и торцевые биения заплечиков вала и гнезда должны соответствовать требованиям нормативных документов на

подшипники с учетом выбранного класса точности подшипника. При изготовлении этих деталей подшипниковых узлов должен быть предусмотрен их тщательный контроль.

4. Конструкция и технология деталей подшипниковых узлов должны обеспечивать соосность посадочных мест, так как даже незначительные перекосы внутренних и наружных колец подшипников сопровождаются существенным увеличением уровней шума и вибрации.

5. Щиты электрических машин по возможности должны быть плоскими; для увеличения их осевой жесткости должны быть предусмотрены ребра.

6. В щитах из легких сплавов, во избежание быстрого износа посадочных гнезд при работе машины, рекомендуется предусматривать стальные втулки.

7. Если в машине устанавливаются шарикоподшипники, то целесообразна осевая нагрузка на подшипник (см. гл. 10). Это в первую очередь относится к подшипникам высокой точности, в которых возможно проскальзывание шариков по беговым дорожкам. Устройство, создающее осевую нагрузку, должно обеспечивать усиления на наружное кольцо подшипника без его перекоса.

8. Монтаж подшипников должен производиться в строгом соответствии с инструкцией завода-изготовителя. Возникающие при монтаже подшипников усилия не должны передаваться через тела качения.

Для обеспечения нормальной работы подшипников конструкция подшипниковых узлов должна быть рассчитана на подачу достаточного количества смазки в течение оговоренного периода работы между заменами смазки. Уплотнения подшипниковых узлов должны надежно предохранять смазку от попадания пыли и влаги, не допуская вытекания жидкой фракции из полости подшипников с двумя защитными шайбами.

12-5. ШУМ И ВИБРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

а) Причины магнитного шума и вибрации

Причинами магнитного шума и вибрации в асинхронных двигателях являются временные и пространственные изменения магнитных сил тяжения, действующих между статором и ротором. Причем опыт показыва-

ет, что наибольший уровень шума вызывают радиальные усилия. Они появляются в машине при взаимодействии в воздушном зазоре гармоник поля, число пар полюсов которых отличается на небольшое значение.

Радиальная сила, действующая на единицу поверхности воздушного зазора (по Максвеллу),

$$R_r = b^2(x', t)/2\mu_0, \quad (12-53)$$

где $b(x', t)$ — мгновенное значение магнитной индукции в воздушном зазоре в момент времени t в точке, сдвинутой на угол x' относительно начала координат.

В общем случае $b(x', t)$ представляет собой бесконечную сумму гармоник поля, обусловленную дискретным распределением обмоток статора и ротора, зубчатостью статора и ротора, а также насыщением участков магнитопровода и эксцентриситетом воздушного зазора. Однако для понимания физики явления достаточно рассмотреть возникновение радиальных сил при взаимодействии двух групп гармоник поля:

$$b(x', t) = [b_1(x', t) + \sum_k b_k(x', t)] + \sum_m b_m(x', t), \quad (12-54)$$

где $b_1(x', t)$ — гармоника основного поля; $b_k(x', t)$ — гармоники поля, частоты которых равны (или близки) частоте основной волны; $b_m(x', t)$ — гармоники поля, частоты которых отличны от частоты основной волны.

Подставляя (12-54) в (12-53), получаем:

$$R_r = \frac{1}{2\mu_0} b^2(x', t) = \frac{1}{2\mu_0} [b_1^2(x', t) + 2b_1(x', t) \sum_k b_k(x', t) + 2b_1(x', t) \sum_m b_m(x', t) + \sum_k b_k^2(x', t) + \sum_m b_m^2(x', t) + \sum_{k_1} \sum_{k_2} b_{k_1}(x', t) b_{k_2}(x', t) + \sum_{m_1} \sum_{m_2} b_{m_1}(x', t) b_{m_2}(x', t) + \sum_k \sum_m b_k(x', t) b_m(x', t)], \quad (12-55)$$

причем $k_1 \neq k_2$ и $m_1 \neq m_2$.

Из (12-55) следует, что в асинхронном двигателе возникает несколько видов радиальных сил:

силы, пропорциональные $b_1^2(x', t)$, $b_1(x', t) b_k(x', t)$, $b_k^2(x', t)$, $b_{k_1}(x', t) b_{k_2}(x', t)$, имеют соответственно порядки $r=0$; $2p$; $p \pm k$; $2k$, $k_1 \pm k_2$ и сравнительно высокие

частоты $f_r=0$; $2f_1$; $f_1 \pm f_k$; $2f_k$; $f_{k_1} \pm f_{k_2}$ и не оказывают значительного акустического действия, поэтому в расчетах шумов машин общего назначения ими обычно пренебрегают. При расчетах вибраций с двойной частотой сети их необходимо учитывать;

силы, пропорциональные $b_m^2(x', t)$ и $b_{m_1}(x', t) b_{m_2}(x', t)$, имеют соответственно порядки $r=0$; $2m$; $m_1 \pm m_2$ и ча-

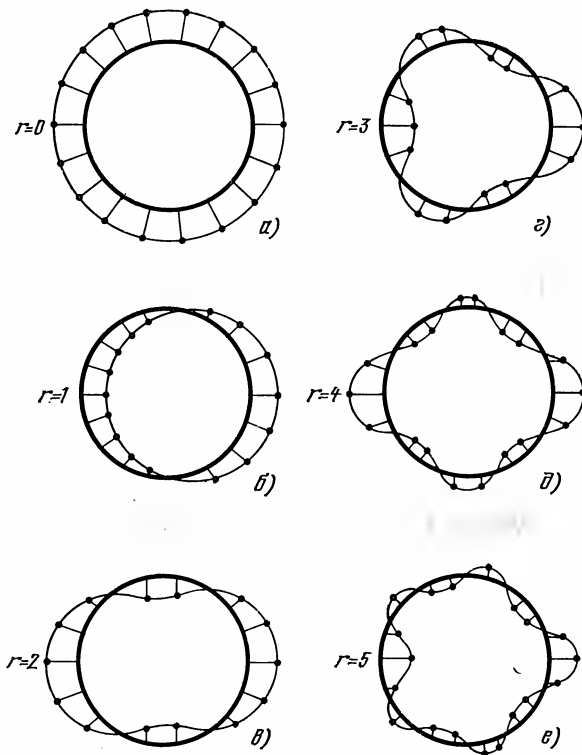


Рис. 12-8. Виды деформации статора.

стоты $f_r=0$; $2f_m$; $f_{m_1} \pm f_{m_2}$; этими силами также можно пренебречь, так как при высоких частотах порядок их велик;

силы, пропорциональные $b_1(x', t) b_m(x', t)$ и $b_k(x', t) b_m(x', t)$, могут иметь при низком порядке $r=p \pm m$; $k \pm m$ высокую частоту $f_r=f_1 \pm f_m$; $f_k \pm f_m$ и наиболее опасны в акустическом отношении.

Порядок радиальных силовых волн определяет вид деформаций частей машины. При $r=0$ радиальные усилия не зависят от пространственной координаты, но периодически изменяются во времени (рис. 12-8, а). В этом случае машина подобна цилиндрическому сосу-ду с изменяющимся во времени внутренним давлением. Такие колебания возникают при интерференции двух гармоник поля с одинаковой длиной волны, но с разными скоростями.

При $r=1$ (рис. 12-8, б) имеет место одностороннее притяжение, действующее на статор и ротор машины. Часто этот вид колебаний приводит к появлению значительных вибрационных моментов.

При $r \geq 2$ возникают радиальные усилия, синусоидально распределенные по окружности статора, которые приводят к изгибу кольца статора (рис. 12-8, в—д). Как показывает опыт, в машинах следует учитывать колебания с порядком $r \leq 8$. Кроме силовых волн низких порядков, необходимо учитывать и силовые волны, порядок которых соизмерим с числом зубцов статора [136]. При передаче усилий через зубцы в спинку статора эти волны могут трансформироваться в волны низких порядков в соответствии с уравнением

$$n = k_n z_1 + r,$$

где r — порядок радиальной силовой волны в воздушном зазоре; n — порядок силовой волны в спинке статора: $k_n=0; \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$

б) Расчет магнитного шума и вибрации

Расчет магнитного шума и вибраций асинхронных двигателей возможен только при решении комплексной задачи из области теории электрических машин, механики и акустики. Он складывается из трех частей:

расчета поля и радиальных сил в воздушном зазоре;
расчета радиальных сил и деформации статора и станины;

расчета вибраций и шума по известным деформациям.

На каждом этапе расчета существуют свои трудности и проблемы, многие из которых окончательно не решены. К этому следует добавить, что магнитный шум и вибрация двигателей одинаковых типоразмеров име-

ют большой разброс: до 10 дБ по общему уровню и до 20 дБ по составляющим, т. е. влияние технологии на уровни шумов и вибраций значительно. По этим причинам точный расчет магнитных шумов и вибраций с учетом всех особенностей конструкции и технологии весьма сложен и может быть выполнен только на ЭВМ большого быстродействия. С учетом последнего обстоятельства ниже даются описание схемы расчета в самом общем виде и приводятся формулы, необходимые для качественной оценки явления.

Расчет поля и радиальных сил в воздушном зазоре

Наибольшее распространение при расчете поля в воздушном зазоре получил метод гармонических проводимостей [53]. В соответствии с этим методом общая проводимость воздушного зазора может быть представлена в виде произведения относительных проводимостей, обусловленных зубчатостью статора и ротора, насыщением зубцов статора и ротора, статическим и динамическим эксцентриситетами:

$$\lambda(x', t) = \Lambda_0 \lambda_\alpha(x', t) \lambda_\beta(x', t) \lambda_j(x', t) \times \\ \times \lambda_{\text{ст}}(x', t) \lambda_{\text{дин}}(x', t), \quad (12-56)$$

где Λ_0 — проводимость равномерного воздушного зазора при ненасыщенной магнитной цепи; $\lambda_\alpha(x', t)$ — проводимость воздушного зазора, обусловленная зубчатостью статора, в общем случае

$$\lambda_\alpha(x', t) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \Lambda_\alpha \cos(\alpha z_1 x'_1 - \varphi_\alpha), \quad (12-57)$$

однако при рациональном выборе системы координат (например, с началом в центре паза статора) фазовый угол $\varphi_\alpha=0$:

$$\lambda_\alpha(x', t) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \Lambda_\alpha \cos \alpha z_1 x'_1; \quad (12-58)$$

$\lambda_\beta(x', t)$ — проводимость воздушного зазора, обусловленная зубчатостью ротора,

$$\lambda_\beta(x', t) = \sum_{\beta=0}^{\infty} \Lambda_\beta \cos \left[\beta z_2 x'_1 - \frac{\beta z_2}{p} (1-s) \omega_1 t - \varphi_\beta \right]; \quad (12-59)$$

$\lambda_j(x', t)$ — проводимость воздушного зазора, обусловленная насыщением зубцов от основного поля,

$$\lambda_j(x', t) = \sum_{j=0}^{\infty} \Lambda_j \cos(2jpx'_1 - 2j\omega_1 t - \varphi_j); \quad (12-60)$$

$\lambda_{ист}(x', t)$ — проводимость воздушного зазора, обусловленная статическим эксцентриситетом,

$$\lambda_{ист}(x', t) = \sum_{i_{ст}=0}^{\infty} \lambda_{ист} \cos(i_{ст} x'_1 - \varphi_{ист}); \quad (12-61)$$

$\lambda_{идин}(x', t)$ — проводимость воздушного зазора, обусловленная динамическим эксцентриситетом,

$$\lambda_{идин}(x', t) = \sum_{i_{дин}=0}^{\infty} \Lambda_{идин} \cos[i_{дин} x'_1 - \frac{i_{дин}}{p}(1-s)\omega_1 t - \varphi_{идин}]. \quad (12-62)$$

Фазовые углы $\varphi_{ист}$ и $\varphi_{идин}$ гармоник проводимостей в (12-61) и (12-62) зависят от принятого положения минимума воздушного зазора относительно начала координат. В (12-56) — (12-62) принято: $\alpha, \beta, j, i_{ст}, i_{дин} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — порядок гармоник проводимостей, вызванных соответственно зубчатостью статора, ротора, насыщением, статическим и динамическим эксцентриситетом; $\Lambda_\alpha, \Lambda_\beta, \Lambda_j, \Lambda_{ист}, \Lambda_{идин}$ — амплитуды гармоник проводимостей, обусловленных соответственно зубчатостью статора и ротора, насыщением зубцов, статическим и динамическим эксцентриситетом; $\varphi_\alpha, \varphi_\beta, \varphi_j, \varphi_{ист}, \varphi_{идин}$ — фазовые углы гармоник проводимостей.

В общем случае полную магнитную проводимость в статорной системе координат с началом в центре паза статора можно записать в виде

$$\lambda(x', t) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \sum_{\beta=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i_{ст}=0}^{\infty} \sum_{i_{дин}=0}^{\infty} \Lambda_{\alpha\beta ji_{ст}i_{дин}} \times \\ \times \cos\left\{\left(\alpha z_1 + \beta z_2 + 2jp + i_{ст} + i_{дин}\right)x'_1 - \left[2j + \frac{\beta z_2 + i_{дин}}{p}(1-s)\right]\omega_1 t - \varphi_{\beta ji_{ст}i_{дин}}\right\}, \quad (12-63)$$

где $\Lambda_{\alpha\beta ji_{ст}i_{дин}}$ — амплитуда гармоник проводимости, в общем случае

$$\Lambda_{\alpha\beta ji_{ст}i_{дин}} = \frac{1}{16} \Lambda_0 a_\alpha a_\beta a_j a_{ист} a_{идин}; \quad (12-64)$$

$a_\alpha, a_\beta, a_j, a_{ист}, a_{идин}$ — амплитуды гармоник относительных проводимостей, обусловленных соответственно зубчатостью статора и ротора, насыщением, статическим и динамическим эксцентриситетом.

При подстановке в (12-64) значений $a_\alpha, a_\beta, a_j, a_{ист} = a_{идин}$ при $\alpha = \beta = j = i_{ст} = i_{дин} = 0$

$$\Lambda_{\alpha\beta ji_{ст}i_{дин}} = \Lambda_0.$$

Выражения для амплитуд гармоник проводимостей при $\alpha, \beta, j, i_{ст}, i_{дин} \neq 0$, а также формулы для определения фазовых углов достаточно сложны и приводятся в специальной литературе [16, 137—141].

Поле статора в общем случае при двусторонней зубчатости, насыщении и различного вида эксцентриситетах может быть представлено в виде

$$b_c(x, t) = f_c(x', t) \lambda(x', t), \quad (12-65)$$

где $f_c(x, t)$ — м. д. с. обмотки статора,

$$f_c(x, t) = \sum_{v'} F_{v'} \cos(v' x' - \omega t - \varphi_{v'}); \quad (12-66)$$

$v' = vp$ — число пар полюсов v -й гармоники м. д. с. обмотки статора.

Для шестизонной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу $v = 6k_1 + 1$. Для других обмоток значение v приведено в гл. 4.

Подставляя в (12-65) значения $f_c(x, t)$ и $\lambda(x, t)$ соответственно из (12-66) и (12-63), имеем:

$$b_c(x', t) = \sum_{v'} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_j \sum_{i_{ст}} \sum_{i_{дин}} \frac{1}{2} F_{v'} \times \\ \times \Lambda_{\alpha\beta ji_{ст}i_{дин}} \cos(v'_c x'_i - \omega_{v'_c} t - \varphi_{v'_c}); \quad (12-67)$$

здесь v'_c — число пар полюсов гармоники поля статора с учетом высших гармоник проводимости от зубчатости, насыщения, эксцентриситета,

$$v'_c = v' + \alpha z_1 + \beta z_2 + 2jp + i_{ст} + i_{дин}; \quad (12-68)$$

ω_{v_c}' — угловая частота этих гармоник поля,

$$\omega_{v_c}' = \left[1 + 2j + \frac{\beta z_2 + i_{\text{дин}}}{p} (1 - s) \right] \omega_1. \quad (12-69)$$

Выбирать гармоники поля с одинаковыми числами пар полюсов и частотой из ряда (12-67) следует, перебирая значения v_c' и α при неизменных β , j , $i_{\text{ст}}$, $i_{\text{дин}}$.

Магнитное поле ротора

$$b_p(x', t) = f_p(x', t) \lambda(x', t), \quad (12-70)$$

где $f_p(x', t)$ — м. д. с. обмотки ротора,

$$f_p(x', t) = \sum_{\nu'} \sum_{k_2} F_{\mu'} \cos(\mu' x' - \omega_p t - \varphi_{\mu'}); \quad (12-71)$$

здесь $F_{\mu'}$ — амплитуда гармоники м. д. с. обмотки ротора, вызванной любой гармоникой v_c' поля статора; μ' — число пар полюсов гармоники м. д. с. обмотки ротора, для короткозамкнутой обмотки

$$\mu' = k_2 z_2 + v_c', \quad k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots; \quad (12-72)$$

ω_p — угловая частота гармоники м. д. с. обмотки ротора,

$$\omega_p = \left[1 + 2j + \frac{(\beta + k_2) z_2 + i_{\text{дин}}}{p} (1 - s) \right] \omega_1. \quad (12-73)$$

Подставляя в (12-70) выражения (12-63) и (12-71), получаем:

$$b_p(x, t) = \sum_{v_c'} \sum_{k_2} \sum_{\alpha'} \sum_{\beta'} \sum_{j'} \sum_{i_{\text{ст}}'} \sum_{i_{\text{дин}}'} \cdot \frac{1}{2} F_{\mu'} \times \\ \times \Lambda_{\alpha' \beta' j' i_{\text{ст}}' i_{\text{дин}}'} \cos(\mu' x' - \omega_{\mu'} t - \varphi_{\mu'}), \quad (12-74)$$

где μ_p' — число пар полюсов гармоник для ротора,

$$\mu_p' = \mu' + \alpha' z_1 + \beta' z_2 + 2j' p + i_{\text{ст}}' + i_{\text{дин}}'; \quad (12-75)$$

$\omega_{\mu'p}$ — угловая частота гармоник поля ротора,

$$\omega_{\mu'p} = \omega_p + \left[2j' + \frac{\beta' z_2 + i_{\text{дин}}}{p} (1 - s) \right] \omega_1. \quad (12-76)$$

(В (12-74) — (12-76) значения j' , β' , $i_{\text{ст}}'$, $i_{\text{дин}}'$ взяты со штрихами для того, чтобы отличить их от значений, использованных при образовании гармоник поля статора v_c' , которые участвуют в создании гармоник м. д. с. обмотки ротора [см. (12-72)].

Таблица 12-6

Частота радиальной силовой волны в воздушном зазоре f_r	Число пар полюсов гармоники поля статора v_c'	Число пар полюсов гармоники поля ротора μ_p'	Причины, вызвавшие гармоники поля ротора	
$\mu_p' - v_c'$	$f_1 \left(\frac{z_2}{p} k_2 \right)$	$(6k_1 + 1) p$	$z_2 k_2 + v_c'$	v_c' -е гармоники поля статора
$\mu_p' + v_c'$	$f_1 \left(\frac{z_2}{p} k_2 + 2 \right)$	$(-6k_1 + 1) p$	$z_2 k_2 + v_c'$	
$\mu_p' + v_c'$	$f_1 \left(-\frac{z_2}{p} k_2 + 2 \right)$	$(6k_1 + 1) p$	$-z_2 k_2 + v_c'$	
$\mu_p' - v_c'$	$f_1 \left(-\frac{z_2}{p} k_2 \right)$	$(-6k_1 + 1) p$	$-z_2 k_2 + v_c'$	
$\mu_p' - v_c'$	$f_1 \left(\frac{z_2}{p} k_2 + 2 \right)$	$(6k_1 + 1) p$	$z_2 k_2 + 3p$	Насыщение зубцов статора и ротора
$\mu_p' + v_c'$	$f_1 \left(\frac{z_2}{p} k_2 + 4 \right)$	$(-6k_1 + 1) p$	$z_2 k_2 + 3p$	
$\mu_p' + v_c'$	$f_1 \left(-\frac{z_2}{p} k_2 + 4 \right)$	$(6k_1 + 1) p$	$-z_2 k_2 + 3p$	
$\mu_p' - v_c'$	$f_1 \left(-\frac{z_2}{p} k_2 + 2 \right)$	$(-6k_1 + 1) p$	$-z_2 k_2 + 3p$	
$\mu_p' - v_c'$	$f_1 \left(\frac{z_2}{p} k_2 \right)$	$(6k_1 + 1) p$	$z_2 k_2 + p \pm 1$	Статический эксцентриситет
$\mu_p' + v_c'$	$f_1 \left(\frac{z_2}{p} k_2 + 2 \right)$	$(-6k_1 + 1) p$	$z_2 k_2 + p \pm 1$	
$\mu_p' + v_c'$	$f_1 \left(-\frac{z_2}{p} k_2 + 2 \right)$	$(6k_1 + 1) p$	$-z_2 k_2 + p \pm 1$	
$\mu_p' - v_p'$	$f_1 \left(-\frac{z_2}{p} k_2 \right)$	$(-6k_1 + 1) p$	$-z_2 k_2 + p \pm 1$	

Продолжение табл. 12-6

Порядок радиальной силовой волны в воздушном зазоре r	Частота радиальной силовой волны в воздушном зазоре f_r	Число пар полюсов гармоник поля статора ν_c	Число пар полюсов гармоник поля ротора μ_p	Причины, вызвавшие гармоники поля ротора
$\mu_p - \nu_c$	$f_1 \left(\frac{z_2 k_2 + 1}{p} \right)$	$(6k_1 + 1)p$	$z_2 k_2 + p + 1$	Динамический эксцентриситет
$\mu_p + \nu_c$	$f_1 \left(\frac{-z_2 k_2 + 1}{p} + 2 \right)$	$(6k_1 + 1)p$	$-z_2 k_2 + p + 1$	
$\mu_p - \nu_c$	$f_1 \left(\frac{z_2 k_2 - 1}{p} \right)$	$(6k_1 + 1)p$	$z_2 k_2 + p - 1$	
$\mu_p + \nu_c$	$f_1 \left(\frac{-z_2 k_2 - 1}{p} + 2 \right)$	$(6k_1 + 1)p$	$-z_2 k_2 + p - 1$	
$\mu_p + \nu_c$	$f_1 \left(\frac{z_2 k_2 + 1}{p} + 2 \right)$	$(-6k_1 + 1)p$	$z_2 k_2 + p + 1$	
$\mu_p - \nu_c$	$f_1 \left(\frac{-z_2 k_2 + 1}{p} \right)$	$(-6k_1 + 1)p$	$-z_2 k_2 + p + 1$	
$\mu_p + \nu_c$	$f_1 \left(\frac{z_2 k_2 - 1}{p} + 2 \right)$	$(-6k_1 + 1)p$	$z_2 k_2 + p - 1$	
$\mu_p - \nu_c$	$f_1 \left(\frac{-z_2 k_2 - 1}{p} \right)$	$(-6k_1 + 1)p$	$-z_2 k_2 + p - 1$	

Множества (12-67) и (12-74) можно объединить в одно и считать, что в воздушном зазоре асинхронной машины существуют результирующие гармоники поля с числом пар полюсов ν'_v и круговой частотой ω_v . В этом случае расчет радиальных сил в воздушном зазоре сводится к выбору из множества гармоник поля тех пар гармоник, которые создают радиальные силовые волны одного порядка и частоты, а затем к сложению этих волн. Осуществление подбора пар гармоник, создающих радиальную силу заданного порядка и частоты, возможно только с использованием современных ЭВМ. Впервые алгоритм такого расчета радиальных сил с учетом условий передачи их из воздушного зазора через зубцы в спинку статора был разработан в Киевском политех-

ническом институте под руководством Ю. А. Шумилова.

Поскольку использовать этот алгоритм при ручном расчете невозможно, выше для качественной оценки дана табл. 12-6, в которой приведены число пар полюсов наиболее значительных гармоник поля статора и ротора, создаваемые ими порядки радиальных силовых волн в воздушном зазоре, а также частоты этих волн (без учета скольжения). Значения коэффициентов k_1 и k_2 в этой таблице следует брать без учета знаков. При анализе большинства асинхронных двигателей средней мощности с шестизонными обмотками и целым числом пазов статора на полюс и фазу q достаточно исследовать гармоники поля статора ν_c при $k_1 = 0, 1, 2, \dots, q, 2q, 3q$ и гармоники поля ротора μ_p при $k_2 = 1, 2, 3$, и $\nu = p; (\pm 6q + 1)p$ (12-72).

Расчет радиальных сил в спинке сердечника статора и деформации статора

Радиальная силовая волна в воздушном зазоре порядка r создает в спинке статора спектр силовых волн порядка $m = k_n z_1 + r$ с угловой частотой

$$\omega_n = \omega_r = \omega_{\nu_c} + \omega_{\mu_p}. \quad (12-77)$$

Амплитуда силовой волны в спинке сердечника статора

$$R_n = R_r \frac{D_{i1}}{D_{i1} + 2h_{z1}} \frac{b_{z1}}{t_1} \alpha_r \alpha_n, \quad (12-78)$$

где R_r — амплитуда раздельной силовой волны в воздушном зазоре (12-53); D_{i1} — внутренний диаметр сердечника статора; h_{z1} — высота зубца статора; t_1 — зубцовое деление статора; α_r, α_n — амплитудные коэффициенты,

$$\alpha_r = \frac{\sin r (b_{z1}/D_{i1})}{r (b_{z1}/D_{i1})}; \quad (12-79)$$

$$\alpha_n = \frac{\sin n [b_{z1}/(D_{i1} + 2h_{z1})]}{n [b_{z1}/(D_{i1} + 2h_{z1})]}. \quad (12-80)$$

Формула (12-78) дана для машин с прямыми пазами. В случае скошенных пазов амплитуда радиальной силовой волны уменьшается на значение, пропорциональное коэффициенту скоса. При расчетах коэффициент скоса обычно вводится в выражения для амплитуд гармоник поля.

Из (12-78) видно, что силовая волна в воздушном зазоре R_r , порядок которой $n=r$, передается в спинку сердечника статора, не меняя своего порядка, однако амплитуда силовой волны уменьшается в $\frac{b_{z1}}{t_1} \alpha_r \alpha_n$ раз.

Силовая волна в спинке сердечника не возникает при $\alpha_r=0$ и $\alpha_n=0$, т.е. если длина волны кратна ширине зубца статора. В то же время в спинке сердечника статора могут возникать силовые волны низких порядков n , вызванные силовыми волнами в воздушном зазоре, порядок которых r соизмерим (но не равен) с числом зубцов z_1 . Подобный механизм имеет место и при передаче силовых волн от спинки сердечника статора к станине, если сердечник крепится на ребрах станины. Результирующая силовая волна $R_{\Sigma n}$ данного порядка n и частоты f_n в спинке статора находится при сложении волн одинаковых порядков и частот с учетом их фаз. Выбор и сложение силовых волн возможно только при помощи специального алгоритма на ЭВМ.

Амплитуду статической деформации, см, для нулевого порядка колебаний ($n=0$) можно найти по формуле

$$A_{cтn=0} = \frac{D_{i1} N}{2E (h_{a1} + \Delta_{ст})} R_{\Sigma 0} \cdot 10^{-5} \quad (12-81)$$

и для $n \geq 2$ по формуле

$$A_{cтn} = \frac{D_{i1} N}{2E (h_{a1} + \Delta_{ст})} \frac{[1 + 3i^2 (n^2 - 1)]}{i^2 (n^2 - 1)} R_{\Sigma n} \cdot 10^{-5}, \quad (12-82)$$

где E — модуль упругости, для стали $E=2 \cdot 10^{11}$ Па; h_{a1} — высота спинки сердечника статора, см; $\Delta_{ст}$ — толщина станины, см; N — средний диаметр спинки статора (со станиной), см,

$$N = D_{i1} + 2h_{z1} + h_{a1} + \Delta_{ст}; \quad (12-83)$$

$$i = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{h_{a1} + \Delta_{ст}}{N}. \quad (12-84)$$

Амплитуда динамической деформации, см, для $n=0$ и $n \geq 2$

$$A_{динn} = A_{cтn} \eta_n; \quad (12-85)$$

здесь η_n — коэффициент динамичности, учитывающий увеличение амплитуды колебаний в случае, если частота вынужденных колебаний f_n , соответствующая частоте

те ω_n по (12-77), близка к частоте собственных колебаний статора (с учетом станины) F_n ,

$$\eta_n = \frac{1}{\sqrt{[1 - (f_n/F_n)^2]^2 + (2\eta_1 f_n/F_n)^2}}; \quad (12-86)$$

$$\eta_1 = 4,165/\sqrt{F_n}. \quad (12-87)$$

Для порядка колебаний $n \geq 2$

$$F_n = F_0 i \varphi_n \frac{n(n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 + 1}}, \quad (12-88)$$

где F_0 — частота собственных колебаний нулевого порядка спинки статора (со станиной) с учетом добавочных масс (зубцов статора, обмотки, ребер, станины),

$$F_0 = f_0 \sqrt{\Delta}; \quad (12-89)$$

здесь f_0 — частота собственных колебаний нулевого порядка спинки статора со станиной, Гц,

$$f_0 = 81\,500/N; \quad (12-90)$$

Δ — коэффициент, учитывающий наличие добавочных масс,

$$\Delta = 1 + \frac{(m_{z1} + m_{m1} + m_{p,ст})}{m_{a1} + m'_{ст}}, \quad (12-91)$$

где m_{z1} — масса зубцов статора; m_{m1} — масса обмотки статора; $m_{p,ст}$ — масса наружных и внутренних ребер станины; m_{a1} — масса спинки сердечника статора; $m'_{ст}$ — масса станины без учета ребер; φ_n — коэффициент, зависящий от порядка колебаний,

$$\varphi_n = \frac{1}{\sqrt{1 + i^2 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right) \left[3 + n^2 \left(4 + \frac{\Delta_m}{\Delta} \right) \right]}}; \quad (12-92)$$

здесь Δ_m — коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции за счет добавочных масс (ребер станины, зубцов и обмотки статора),

$$\Delta_m = 1 + \frac{z_1 Q_{z1} + n_p Q_p}{2\pi J_{сш} N}. \quad (12-93)$$

В формуле (12-93) $J_{сш}$ — момент инерции спинки статора (без учета ребер), см⁴,

$$J_{сш} = I_1 (h_{a1} + \Delta_{ст})^3/12, \quad (12-94)$$

где l_1 — длина сердечника статора, см; Q_{z1} — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции за счет зубцов и обмотки статора,

$$Q_{z1} = F_{z1} h_{z1}^3 \left[\frac{1}{3} + \frac{h_{a1} + \Delta_{ст}}{2h_{z1}} + \left(\frac{h_{a1} + \Delta_{ст}}{2h_{z1}} \right)^2 \right]; \quad (12-95)$$

здесь F_{z1} — эквивалентное сечение зубца статора, см⁴,

$$F_{z1} = b_{z1} l_1 \frac{m_{z1} + m_{м1}}{m_{z1}}; \quad (12-96)$$

n_p — число ребер станины; Q_p — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции за счет ребер станины,

$$Q_p = F_p h_p^3 \left[\frac{1}{3} + \frac{h_{a1} + \Delta_{ст}}{2h_p} + \left(\frac{h_{a1} + \Delta_{ст}}{2h_p} \right)^2 \right], \quad (12-97)$$

где h_p — высота ребра, см; $F_p = b_p l_p$ — сечение ребра, см²; b_p — ширина ребра, см; l_p — длина ребра, см.

Собственная частота колебаний для первого порядка ($n=1$) приближенно определяется по формуле

$$F_{n=1} = 5 \sqrt{\frac{K_2 (m_p + m_{ст,щ})}{m_p m_{ст,щ}}}, \quad (12-98)$$

где K_2 — жесткость ротора, кГ/см,

$$K_2 = 5 \cdot 10^6 L_1 (d/L_1)^4; \quad (12-99)$$

здесь d — наибольший диаметр вала, см.

Амплитуда динамической деформации при $n=1$

$$A_{динn=1} = R_{с1} \frac{25m_p f_n^2}{(25K_2 - m_{ст,щ} f_n^2)(25K_2 - m_p f_n^2) - 625K_2}, \quad (12-100)$$

Расчет вибрации и шума по известным деформациям

Эффективное значение вибрационной скорости в станине, мм/с,

$$v_{эф,м} = 10\pi \sqrt{2} f_n A_{динn}. \quad (12-101)$$

Эффективное значение вибрационного ускорения в станине, мм/с²,

$$a = 20\pi^2 \sqrt{2} f_n^2 A_{динn}. \quad (12-102)$$

Значение вибрационного ускорения в относительных единицах (уровень) вычисляется по (12-5). Звуковая мощность, излучаемая машиной, Вт,

$$P_{зв} = K_p \left(\frac{D_{ст}}{2} \right)^2 f_n^2 N_* A_{динn}^2, \quad (12-103)$$

где $D_{ст}$ — наружный диаметр станины, см; K_p — коэффициент, зависящий от порядка колебаний,

$$K_p = 1,05 \cdot 10^{-3} / (2n + 1); \quad (12-104)$$

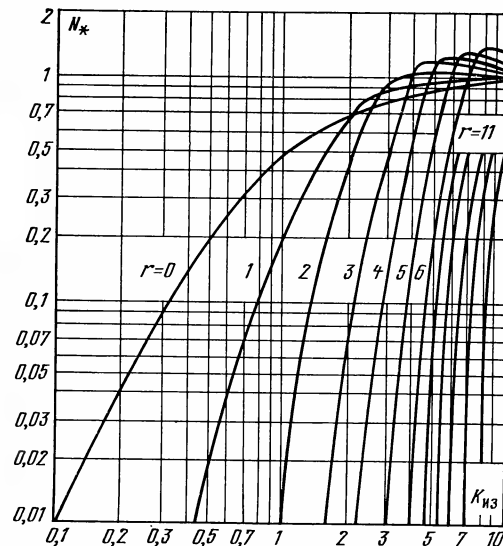


Рис. 12-9. Зависимость относительной мощности N_* от коэффициента $K_{из}$ для колебаний различных порядков.

N_* — относительная мощность излучения, определяемая по рис. 12-9 в зависимости от длины звуковой волны $3,42 \cdot 10^4 / f_n$, см, и отношения размера машины (излучателя) к длине излучаемой волны

$$K_{из} = \pi D_{ст} / \lambda. \quad (12-105)$$

Уровень звуковой мощности, дБ,

$$L_p = 10 \lg \frac{P_{зв}}{10^{-12}}. \quad (12-106)$$

в) Рекомендации по снижению уровня шума и вибраций магнитного происхождения

Уровни магнитных шумов и вибраций в электрических машинах можно уменьшить:

снижением радиальных усилий при помощи рациональной геометрии активной части машины или снижения электромагнитных нагрузок;

изменением соотношения собственных частот и частот возмущающих сил;

применением специальных средств гашения вибрации и шума (виброизоляция, динамические виброгасители).

Наиболее эффективными средствами уменьшения радиальных сил в асинхронных двигателях являются:

1) рациональный выбор соотношения числа пазов статора и ротора, при котором порядок силовой волны в воздушном зазоре, обусловленный наиболее опасными зубцовыми гармониками, был бы возможно большим. Одновременно частота магнитной силовой волны должна быть достаточно удалена от частот свободных колебаний статора (со станиной) порядков $n=0, 1, 2, 3$

$$0,8F_n \geq f_n \geq 1,3F_n. \quad (12-107)$$

Учитывая, что шумовые характеристики машины зависят от ее размеров, конкретные рекомендации по подбору соотношений числа пазов дать трудно. О пригодности тех или иных соотношений можно качественно судить после расчета частот возбуждающих сил и частот собственных колебаний.

Благоприятным с акустической точки зрения является число пазов ротора, удовлетворяющее условию [141]

$$z_2 = z_1 + 4p. \quad (12-108)$$

Пазы ротора, выбранные в соответствии с равенством (12-108), должны иметь скос, необходимый для подавления синхронных моментов. При анализе шумовых характеристик двигателей существующих серий необходимо сравнивать между собой двигатели одной высоты оси вращения и числа пар полюсов, но не одной мощности и разных высот оси вращения;

2) скос пазов статора или ротора. Как правило, наибольший эффект снижения шума дает скос пазов на 0,8—1,5 зубцового деления статора или ротора. При

этом в случае $z_1 < z_2$ рекомендуется скашивать пазы на зубцовое деление статора, а при $z_1 > z_2$ — на зубцовое деление ротора;

3) увеличение воздушного зазора до максимального допустимого по энергетическим показателям значения;

4) рациональный выбор шага обмотки. Для двухслойных обмоток рекомендуется выбирать шаг, близкий к $\frac{5}{6}$ диаметрального. У обмоток со 120-градусной фазной зоной шаг должен быть диаметральным;

5) эксцентриситет воздушного зазора электродвигателя должен быть минимальным;

6) предпочтительны полузакрытые пазы на статоре. Для уменьшения наиболее интенсивных гармоник проводимости желательно применение закрытых пазов на роторе с максимально допустимой по энергетическим показателям высотой мостика. При открытых и полузакрытых пазах рекомендуется применение магнитных клиньев;

7) для особо малошумных машин возможно снижение электромагнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки) при одновременном снижении номинальной мощности электродвигателя;

8) для уменьшения шума при пуске рекомендуется переклечение схемы обмоток со звезды на треугольник, если это возможно по условиям пуска.

Для изменения собственных частот электродвигателя рекомендуются:

1) правильный выбор материала станины. Для двигателей с пониженной вибрацией предпочтение следует отдавать корпусам из чугунного литья;

2) увеличение жесткости щитов и станины машины. Щиты рекомендуется выполнять плоскими с радиальными ребрами жесткости. Для получения минимального числа собственных частот конструкция щитов и станины должна по возможности иметь радиальную симметрию;

3) обеспечение хорошего качества прессовки сердечника статора и ротора. Давление при прессовке пакета должно быть не менее $(4-8) \cdot 10^6$ Па. Распушение пакета должно быть минимальным. Для малошумных машин рекомендуется применение склеенных пакетов;

4) увеличение жесткости лап.

К специальным средствам снижения вибрации и шума относятся упругая подвеска статора, упругие опоры, динамические виброгасители и глушители шума. Как

правило, применение специальных мер для гашения вибрации и шума усложняет конструкцию машины и во многих случаях ведет к ухудшению охлаждения, поэтому эти средства могут быть рекомендованы только для специальных электродвигателей с особо жесткими требованиями к виброшумовым характеристикам.

Глава тринадцатая

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

13-1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Экономические расчеты при проектировании асинхронных двигателей проводятся для определения экономической эффективности новых разработок и технико-экономического обоснования выбора оптимального варианта. В первом случае выполняется полный экономический расчет; во втором — расчет может быть упрощенным.

Критерием целесообразности создания и внедрения новых разработок является экономический эффект, определяемый на годовой объем производства новой техники в расчетном году (годовой экономический эффект).

За расчетный год принимается первый год после окончания планируемого (нормативного) срока освоения производства новой техники. Как правило, это второй или третий календарный год серийного выпуска новой продукции.

Годовой экономический эффект представляет собой суммарную экономию всех производственных ресурсов (живого труда, материалов, капитальных вложений), которую получит народное хозяйство в результате производства и использования новой техники. Определение экономического эффекта основывается на сопоставлении приведенных затрат по базовой и новой технике.

Приведенные затраты представляют собой сумму себестоимости и нормативной прибыли:

$$Z = C + E_n K, \quad (13-1)$$

где Z — приведенные затраты на единицу продукции, руб.; C — себестоимость единицы продукции, руб.; K —

удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Для обеспечения адекватного в масштабе всего общественного производства подхода к оценке экономической эффективности в расчете используется единый нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, равный 0,15.

При определении годового экономического эффекта должна быть обеспечена сопоставимость новых и базовых машин.

При этом новые машины (серии) должны иметь наилучшие технико-экономические параметры и полностью соответствовать заданным техническим требованиям, а базовые машины (серии) должны быть наилучшими из выпускаемых. Кроме того, обязательно, чтобы сравниваемые машины совпадали по частоте вращения, напряжению, степени защиты, а также были бы равны по номинальной мощности. При разных шкалах мощностей сравниваемых серий разница в мощности сопоставляемых машин должна быть меньше одной ступени шкалы. Таким образом, сравнение новой машины должно производиться с равной или большей по мощности базовой машиной, затраты на которую должны быть приведены к мощности новой машины умножением на отношение их мощностей.

При сравнении серии машин производится сравнение ограниченного числа представителей, в качестве которых должны быть взяты наиболее массовые типоразмеры, притом значительно отличающиеся по мощности и частоте вращения.

При расчетах годового экономического эффекта учитывается фактор времени в тех случаях, когда капитальные вложения осуществляются в течение ряда (трех и более) лет.

Фактор времени учитывается путем приведения к одному моменту времени единовременных и текущих затрат на разработку и внедрение новой и базовой техники. Такое приведение выполняется умножением затрат (если затраты осуществлялись до начала расчетного года) на коэффициент приведения

$$\alpha_t = (1 + E)t, \quad (13-2)$$

где E — норматив приведения (0,1); t — число лет, от-

деляющих затраты и результаты данного года от начала расчетного года.

В общем случае суммарные капитальные вложения K_T , руб., приведенные к расчетному году, определяются по формуле

$$K_T = \sum_{n=1}^T K_n (1 + E)^{T-n} \quad (13-1)$$

где K_n — капитальные вложения n -го года; T — общая продолжительность создания и освоения новой техники; n — порядковый год создания и освоения новой техники; $T-n$ — число лет приведения капитальных вложений.

Расчет годового экономического эффекта, руб., приводится по формуле

$$\mathcal{E} = \left[3_6 \frac{B_n}{B_6} \frac{P_6 + E_n}{P_n + E_n} + \frac{(I'_6 - I'_n) - E_n (K'_n - K'_6)}{P_n + E_n} - 3_n \right] A_n \quad (13-2)$$

где 3_6 и 3_n — приведенные затраты базовой и новой машин соответственно [см. (13-1)]; B_n/B_6 — коэффициент учета роста производительности труда; B_6 и B_n — годовые объемы продукции, производимые при использовании базовой и новой машин; $(P_6 + E_n)/(P_n + E_n)$ — коэффициент учета изменения срока службы новой машины по сравнению с базовой; P_6 и P_n — доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (ремонтирование) базовой и новой машины,

$$P = \frac{E}{(1 + E)^{T_c} - 1}; \quad (13-3)$$

здесь T_c — срок службы.

Второе слагаемое в (13-2) определяет экономию у потребителя на текущих издержках эксплуатации, отчисленных от сопутствующих капитальных вложений за весь срок службы новой машины по сравнению с базовой; K'_6 и K'_n — сопутствующие капитальные вложения потребителя (без учета стоимости рассматриваемых машин) при использовании базовых и новых машин в расчете на объем продукции, производимой с помощью новых машин; $I'_6 - I'_n$ — годовые эксплуатационные издержки у потребителя при использовании им базовых и новых машин. В этих издержках учитывается только часть амортизации, предназначенная на капитальный

ремонт машин, т. е. без учета средств на их реновацию, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя; A_n — годовой объем производства машин в расчетном году.

Расчет годового экономического эффекта от производства и использования новой техники, применяемой в нескольких сферах потребления, производится по формуле

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i A_i, \quad (13-6)$$

где n — количество сфер потребления.

При определении годового экономического эффекта в составе капитальных вложений изготовителей и потребителей новой техники учитываются как непосредственные капитальные вложения, включающие затраты в соответствии с Методическими указаниями к составлению плана развития народного хозяйства СССР, Госплана СССР, так и другие единовременные затраты, необходимые для создания и использования техники вне зависимости от источников финансирования. К этим затратам относятся:

затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, включая испытания и доработку опытных образцов;

затраты на приобретение, доставку, монтаж, демонтаж, техническую подготовку, наладку и освоение производства;

затраты на пополнение оборотных фондов, связанных созданием и использованием новой техники;

стоимость необходимых производственных площадей и других элементов основных фондов. Здесь должно быть учтено уменьшение требуемых производственных площадей у потребителя при улучшении компактности машин (см. гл. 3);

затраты на технические мероприятия и установки, предотвращающие отрицательные последствия влияния эксплуатации техники на природную среду (предотвращения загрязнения), а также на условия труда (снижение производственного шума и т. д.);

убыток (со знаком плюс) или прибыль (со знаком минус) от производства и реализации продукции в период освоения производства, предшествующий расчетному году.

Расчеты снижения себестоимости продукции должны учитывать только те затраты, которые изменяются в связи с производством и использованием новой техники. При этом цеховые и общезаводские расходы должны быть скорректированы прямой счета по уменьшающимся статьям.

Критерием экономической эффективности при выборе наилучшего варианта служат наименьшие приведенные затраты Z_T , руб. на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию двигателя за нормативный срок окупаемости,

$$Z_T = C_n + (C_a + C_o) T_n + E_n (C_p + C_v) + C_s, \quad (13-7)$$

где C_n — стоимость изготовления двигателя и затраты на его монтаж, руб.; C_a — годовые затраты на активные потери электроэнергии, руб., C_o — годовые затраты на обслуживание двигателя (затраты на амортизацию и ремонты, а также затраты на компенсацию ущерба от простоя оборудования из-за выхода из строя двигателя), руб.; C_p — единовременные затраты на разработку (затраты на научно-исследовательские работы, связанные с разработкой новых или модернизацией существующих конструкций, затраты на проектирование и отработку конструкций и технологии, в том числе на изготовление макетных, опытных образцов, их испытания и исследования), руб.; C_v — единовременные затраты на внедрение — затраты на постройку дополнительных помещений и сооружений, перепланировку и переоборудование существующих производственных помещений, приобретение и монтаж нового или дополнительного оборудования, изготовление новой оснастки и инструмента, на компенсацию потерь, связанных с реорганизацией производства, например убытки от возможного снижения выпуска при переходе на новые или модернизированные изделия и т. д.*; C_s — затраты потребителя на компенсирующие устройства и необходимые производственные площади, руб.; T_n — нормативный срок окупаемости, лет,

$$T_n = 1/E_n. \quad (13-8)$$

* Из этих затрат надо вычесть сумму, полученную в результате реализации неиспользуемых ранее действовавших основных средств производства. Если предприятие для выпуска новых или модернизированных изделий обеспечивается дополнительными оборотными средствами, то это должно соответственно учитываться.

В последующих параграфах изложены приближенные методы расчета отдельных видов затрат по данным электромагнитного расчета, эскизной проработки конструкции новых машин на основе анализа соотношения затрат на базовые машины, а также даны упрощенные формулы расчета затрат, применяемые при технико-экономической оценке вариантов.

13-2. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ДВИГАТЕЛЯ И ЗАТРАТ НА ЕГО МОНТАЖ

Стоимость изготовления двигателя C_n определяется его полной себестоимостью. При упрощенных расчетах полной себестоимости затраты подразделяют на следующие укрупненные статьи:

1) затраты на материалы. Сюда относят затраты на основные материалы, полуфабрикаты и покупные комплектующие изделия как на сами машины, так и на запчасти и штатный инструмент к ним;

2) затраты на основную заработную плату производственных рабочих;

3) затраты на дополнительную заработную плату производственных рабочих и отчисления на социальное страхование;

4) цеховые расходы, включая расходы на содержание и эксплуатацию оборудования;

5) общезаводские расходы;

6) внепроизводственные расходы на сбыт продукции (на упаковку готовой продукции, ее транспортировку до станции отправления, на рекламу и пр.).

Затраты по пп. 2—5 условно можно назвать трудовыми затратами. Затраты на материалы в сумме с трудовыми составляют производственную себестоимость двигателей. Производственная себестоимость в сумме с внепроизводственными затратами составляет полную себестоимость двигателей.

а) Затраты на материалы.

Расчет по структуре затрат

Для расчета по структуре затрат сначала определяют затраты на активные материалы, к которым относят затраты на электротехническую сталь C_c , на материал

для обмотки статора $C_{м1}$ и на материал для обмотки короткозамкнутого или фазного ротора $C_{м2}$,

$$\left. \begin{aligned} C_c &= m'_c \Pi_c; \\ C_{м1} &= m'_{м1} \Pi_{м1}; \\ C_{м2} &= m'_{м2} \Pi_{м2}, \end{aligned} \right\} \quad (13-9)$$

где $m'_c, m'_{м1}, m'_{м2}$ — заготовительная масса стали, обмоточного провода, материала обмотки ротора; $\Pi_c, \Pi_{м1}, \Pi_{м2}$ — цена стали, обмоточного провода, материала обмотки ротора.

Затраты на активные материалы

$$C_{a,м} = C_c + C_{м1} + C_{м2}. \quad (13-10)$$

Дальнейший расчет основан на анализе структуры затрат на материалы основного исполнения короткозамкнутых двигателей серии 4А (IP44 и IP23) с высотами оси вращения 160—250 мм с числом полюсов 2, 4, 6 и 8, а также для двигателей АО2 (IP44) шестого — девятого габаритов с тем же числом полюсов. В табл. 13-1 приведены усредненные результаты этого анализа, а также данные для серий А и АО [147].

Следует отметить, что структура затрат на материалы высокоиспользованных серий 4А и АО2 с изоляцией класса F весьма сходна. Структура же затрат на материалы серий А и АО с изоляцией преимущественно класса А резко отличается большей долей затрат на активные материалы и меньшей долей затрат на изоляцию и конструкционные материалы.

Таблица 13-1

Серия	Исполнение по степени защиты	Класс нагревостойкости изоляции	Доля затрат, %		
			Активные материалы	Изоляционные материалы и выводной провод	Конструкционные материалы и подшипники
4А	IP44	F	51,8	17,0	31,2
4А	IP23	F	53,4	17,9	28,7
АО2	IP44	F	52,3	18,6	29,1
А и АО	Закрытое и защищенное	А, В	69,1	7,5	23,4

* В стоимость литых конструкционных деталей включены и затраты на отливку.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно установить закономерность, характерную для серии с одинаковым классом нагревостойкости изоляции и свойствами электротехнической стали, конструкции и состоящую в практически постоянной величине относительных затрат на активные ($C_{ам}$), изоляционные ($C_{им}$) и конструкционные материалы (C_k), что можно выразить формулами:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{a,м} &= C_{a,м}/C_{м} \approx \text{const}; \\ \lambda_{и,м} &= C_{и,м}/C_{м} \approx \text{const}; \\ \lambda_k &= C_k/C_{м} \approx \text{const}, \end{aligned} \right\} \quad (13-11)$$

где $C_{м}$ — суммарные затраты на материалы для данного двигателя.

Исходя из этой закономерности, можно обоснованно рекомендовать следующий упрощенный способ расчета затрат на материалы.

1. Определить для проектируемого двигателя (индекс «н») $C_{с,н}, C_{м1н}, C_{м2н}$ и $C_{a,м,н}$ по (13-2), (13-10).
2. Определить для базовой машины (индекс «б») по типовым или отчетным калькуляциям заводов-изготовителей $C_{с,б}, C_{м1б}, C_{м2б}, C_{a,м,б}, C_{м,б}$.
3. Определить $\lambda_{a,м,б}$ (13-11).
4. Определить затраты на материалы нового двигателя

$$C_{м,н} = \frac{1,06 C_{a,м,н}}{\lambda_{a,м,б} K_{\lambda м}}, \quad (13-12)$$

где $K_{\lambda м}$ — поправочный множитель, учитывающий влияние на структуру затрат на материалы особенностей новых машин, $K_{\lambda м}$ будет существенно отличаться от единицы при значительном отличии новых машин от базовых по классу нагревостойкости изоляции, свойствам электротехнической стали, по ценам на применяемые материалы или по конструкции, в противном случае $K_{\lambda м} = 1$. Значение $K_{\lambda м}$ определяется экспертной оценкой; коэффициент 1,06 в (13-12) учитывает транспортные расходы.

Формула (13-12) применима не только для двигателей рассмотренных в табл. 13-1 высот оси вращения, но и для асинхронных двигателей других высот и исполнений. По данным табл. 13-1 для современных дви-

гателей общего назначения с высотами оси вращения 160—250 мм $\lambda_{a,m}=0,52\div 0,54$.

Расходы на материалы асинхронных двигателей модификаций и узкоспециализированных исполнений, например с фазным ротором, повышенного скольжения лифтовых и т. д., можно рассчитывать либо способом, указанным выше для основного исполнения, либо путем сравнения с затратами на материалы двигателей основного исполнения того же типоразмера. Установив отличительные (в отношении затрат на материалы) особенности двигателей модификаций или узкоспециализированных исполнений, можно рассчитать обусловленные этим дополнительные затраты на материалы. Так, двигатель с фазным ротором отличается от короткозамкнутого того же исполнения и типоразмера обмоткой ротора, наличием контактных колец, щеточного механизма, кожуха контактных колец (не всегда), длиной вала и конструкцией переднего щита. Чтобы определить затраты на материалы двигателя с фазным ротором, надо дополнительные затраты, обусловленные этими особенностями, прибавить к затратам на короткозамкнутый двигатель того же исполнения и типоразмера.

б) Трудовые затраты

Расчет по структуре затрат

Полная себестоимость двигателя

$$C = K_{\text{вн}}(C_{\text{м}} + C_{\text{т}}), \quad (13.10)$$

где $K_{\text{вн}}$ — коэффициент, учитывающий внепроизводственные расходы; $C_{\text{т}}$ — трудовые затраты.

Анализируя структуру затрат на изготовление асинхронных двигателей, можно установить, что для каждой серии характерно приблизительно постоянное отношение затрат на материалы к полной себестоимости C , т. е.

$$\lambda_{\text{м}} = C_{\text{м}}/C = \text{const}. \quad (13.11)$$

Исходя из этого, затраты на изготовление двигателя новой серии, заменяющей данную, можно определить как

$$C_{\text{н}} = C_{\text{м,и}}/\lambda_{\text{м,б}} K_{\lambda}, \quad (13.12)$$

где $\lambda_{\text{м,б}} = C_{\text{м,б}}/C_{\text{б}}$ определяется по плановым или отчетным калькуляциям заводов-изготовителей; K_{λ} — поправочный множитель, учитывающий особенности новых машин, определяемый экспертной оценкой.

При определении $\lambda_{\text{м}}$ надо иметь в виду, что обычно в новых машинах одновременно снижаются и затраты на материалы и трудовые затраты, а следовательно, снижается и производственная себестоимость, поэтому отношение $\lambda_{\text{м}}$ меняется в меньшей степени, чем каждая из составляющих себестоимости.

В качестве примера в табл. 13-2 приведена структура затрат на двигатели серий А и АО мощностью до 100 кВт [147].

Таблица 13-2

Затраты	Доля затрат, %	Затраты	Доля затрат, %
Материалы и основные материалы	59,8	Прочие производственные расходы	1,2
Основная зарплата	8,8	Внепроизводственные расходы	4,7
Несовые расходы*	20,4	Всего	100
Общезаводские расходы	5,1		

* Включая затраты по содержанию и эксплуатации оборудования.

Таким образом, для серий А и АО до 100 кВт $\lambda_{\text{м}} \approx 0,6$. По данным расчетов нескольких двигателей серии 4А, несмотря на значительные изменения сортаментов и расхода материалов, технологии изготовления, серийности и организации производства и тем самым отдельных видов затрат на изготовление, отношение затрат на материалы к полным затратам на изготовление изменилось незначительно. Для ориентировочных предварительных расчетов двигателей серии 4А и 4АН с высотами оси вращения до 250 мм можно принять $\lambda_{\text{м}} \approx 0,6\div 0,65$ и $K_{\lambda} \approx 1$.

В общем случае расчет затрат на изготовление по структуре затрат надо вести следующим образом:

1. Выбрать базовую машину.
2. По плановым или отчетным калькуляциям заводов-изготовителей определить для базовой машины $C_{\text{м,б}}$, $C_{\text{б}}$, $\lambda_{\text{м,б}}$.

3. Определить для проектируемой машины $C_{м.п}$
4. Экспертной оценкой определить K_λ .
5. По (13-15) найти C_n .

Расчет трудоемкости изготовления и основной заработной платы производственных рабочих

Затраты на основную заработную плату производственных рабочих

$$T_3 = a \sum_i \tau_i, \quad (13-16)$$

где τ_i — трудоемкость i -го вида работ по изготовлению двигателя в нормо-часах; $\sum \tau_i$ — суммарная трудоемкость в нормо-часах; a — средняя оплата одного нормо-часа, руб.

Правильное определение трудоемкости изготовления двигателей важно по следующим причинам:

1) при упрощенных расчетах затраты на дополнительную заработную плату производственных рабочих и социальное страхование, цеховые и общезаводские расходы исчисляются пропорционально T_3 ;

2) данные о трудоемкости изделий являются исходной базой важнейших плановых, экономических и социальных расчетов и в первую очередь расчета потребности в рабочей силе.

Технологические процессы изготовления асинхронных двигателей при упрощенных расчетах следует сгруппировать по следующим пяти видам работ: литейные или сварочные (при сварных оболочках) τ_1 ; обработка металлов резанием τ_2 ; изготовление магнитопровода (штамповка, термообработка, лакировка, шихтовка) τ_3 ; изолировка, обмотка, пропитка и сушка τ_4 ; сборка узловая и общая, контрольно-испытательные работы, отделка и консервация τ_5 .

При развернутых расчетах группу τ_4 разделяют на два вида работ: изолировку и обмотку, пропитку и сушку, а группу τ_5 на три вида работ: 1) сборку; 2) испытание; 3) отделку и консервацию.

Трудоемкость новой машины можно определить следующим образом:

1. Выбрать базовую машину.

По плановым или отчетным калькуляциям заводоизготовителей вычислить для базовой машины трудо-

емкость по отдельным группам работ $\tau_{16}, \tau_{26}, \tau_{36}, \tau_{46}$, и среднюю оплату одного нормо-часа.

3. Экспертной оценкой найти поправочные множители

$$\lambda_{\tau i} = \tau_{iH} / \tau_{i6}. \quad (13-17)$$

4. Определить

$$\sum_{i=1}^5 \tau_{iH} = \sum_{i=1}^5 \lambda_{\tau i} \tau_{i6}. \quad (13-18)$$

5. Экспертной оценкой найти поправочный множитель для средней оплаты нормо-часа

$$\lambda_a = a_H / a_6. \quad (13-19)$$

6. Вычислить

$$T_{3H} = \lambda_a a_6 \sum_{i=1}^5 \tau_{iH}. \quad (13-20)$$

Затраты на дополнительную заработную плату и отчисления на социальное страхование

В статью «Дополнительная заработная плата производственных рабочих» включаются выплаты, предусмотренные трудовым законодательством или коллективными договорами за неотработанное на производстве время (отпуска, оплата льготных часов и пр.). Исходя из примерной структуры годового полезного фонда времени [145], можно приближенно считать, что дополнительная заработная плата составляет:

$$\frac{259 \cdot 8}{230 \cdot 7,52} - 1 \approx 0,2 \text{ основной,}$$

т.е. 259 — число календарных рабочих дней в году; 230 — число рабочих дней в году; 8 — число часов рабочего дня; 7,52 — средняя продолжительность рабочего дня.

В статью «Отчисления на социальное страхование» включаются выплаты на эти цели по установленным ставкам с общей суммы заработной платы производственных рабочих. Отчисления по социальному страхованию составляют для рабочих электротехнической промышленности 6,6%. Таким образом, можно считать,

что суммарные затраты на заработную плату и социальное страхование составляют $(1+0,2) \cdot 1,066 = 1,28$ основной заработной платы производственных рабочих.

Цеховые, общезаводские расходы

При упрощенных расчетах цеховые и общезаводские расходы исчисляются пропорционально основной заработной плате производственных рабочих. Эти расходы зависят от технологии изготовления, от степени механизации и автоматизации производства, от сложности выпуска, от организации производства и от сложности

Таблица 13

Серия	Цеховые и общезаводские расходы в долях основной заработной платы производственных рабочих $K_{ц} + K_{о}$	Внепроизводственные расходы в долях производственной себестоимости $K_{вн} - 1$
А2 и АО2 до девятого габарита включительно	3	0,04
4А и 4АН: $h=56 \div 132$ мм	5	0,02
$h=160 \div 250$ мм	4	0,044

темы управления им. Обычно они не рассчитываются, а определяются по отчетным данным предприятий-изготовителей. При оценке этих данных весьма существенно, производится ли учет по каждому изделию в отдельности или по всем изделиям в целом. Надо иметь в виду, что даже для одних и тех же изделий расходы на разных предприятиях могут значительно отличаться [147].

В табл. 13-3 приведены усредненные сугубо ориентировочные данные расходов для проектных расчетов. Их следует по возможности уточнять по данным предприятий-изготовителей.

в) Внепроизводственные расходы

При упрощенных расчетах внепроизводственные расходы вычисляются пропорционально производственной себестоимости двигателя [см. (13-13)]. Ориентировочные данные для определения внепроизводственных расходов приведены в табл. 13-3.

г) Полная себестоимость и предварительная цена двигателя; затраты на монтаж

На основании приведенных данных полная себестоимость нового двигателя C_n , руб.,

$$C_n = [C_{м,н} + T_{з,н} (1,28 + K_{ц} + K_{о})] K_{вн}, \quad (13-21)$$

где $C_{м,н}$ — по (13-12); $T_{з,н}$ — по (13-16) или (13-20); 1,28 — коэффициент затрат на аварийную плату и социальное страхование; $K_{вн}$, $K_{ц} + K_{о}$ — по табл. 13-3.

Предварительная цена двигателя C_d , руб., при проектировании определяется как

$$C_d = C_n (1 + p_n), \quad (13-22)$$

где p_n — норматив рентабельности. Для двигателей серийного производства принимается $p_n = 0,12$.

При проектных экономических расчетах единовременные затраты на монтаж включаются в единовременные затраты на приобретение двигателя. По данным монтажных организаций, в среднем затраты на монтаж t_m составляют 0,3 цены двигателя. Таким образом, $t_m = 0,3$, $C_d = 0,3 \cdot 1,12 C_n = 0,34 C_n$, а полные затраты $C_{н,л}$, руб., включая и затраты на монтаж,

$$C_{н,л} = 1,34 C_n. \quad (13-23)$$

13. РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА АКТИВНЫЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Годовые затраты на активные потери электроэнергии, руб., определяются формулой

$$C_a = C_a t \xi \frac{P_2}{\eta_{\xi}} (1 + p_s - \eta_{\xi}), \quad (13-24)$$

где C_a — средняя цена электроэнергии, принято $C_a = 0,01$ руб./кВт·ч; t — число часов работы двигателя в год (см. гл. 3); ξ — коэффициент загрузки (см. гл. 1); η_{ξ} — к. п. д. двигателя при действительной нагрузке; $p_s = 0,04$ — средние удельные потери на 1 кВт·ч передаваемой электроэнергии в пределах одной ступени трансформации.

а) Затраты на амортизацию

К затратам на обслуживание относятся затраты на амортизацию и ремонты, а также затраты на компенсацию ущерба от простоя оборудования из-за выхода из строя электродвигателей.

Амортизационные отчисления состоят из отчислений на реновацию и капитальный ремонт. Отчисления на реновацию могут быть вычислены по формуле (13-5)

Относительное значение амортизационных отчислений p_{a1} может быть принято равным 0,055 для двигателей мощностью до 100 кВт и 0,04 для двигателей свыше 100 кВт.

Затраты на амортизацию за один год

$$Z_{ам} = P_{ам} C_n \quad (13-26)$$

б) Затраты на ремонты

В расчет входят затраты на планово-предупредительные (мелкие и средние) ремонты всех двигателей и на восстановительные (капитальные) ремонты двигателей, вышедших из строя в течение нормативного срока окупаемости, а также на компенсацию ущерба вследствие выхода из строя двигателей. При ориентировочных расчетах принимают, что все эти затраты составляют 0,4—0,8 цены двигателя. Большие значения берутся при более тяжелых условиях эксплуатации, например при работе двигателей в сырых и запыленных помещениях и т. п.

Более детально, учитывая надежность двигателей, затраты на ремонты $Z_{рем}$, руб., за 1 год можно подсчитать как

$$Z_{рем} = (S_y P_2 + S_k) [1 - \ln R(T_{нар})] \frac{t}{T_{сл}} + (K_m n_m S_m + K_{ср} n_{ср} S_{ср}) \quad (13-26)$$

Ниже указаны необходимые данные для определения величин, входящих в (13-26).

$T_{нар}$ — заданная наработка электродвигателя, ч

$R(T_{нар})$ — вероятность безотказной работы в течение заданной наработки. Согласно ГОСТ 19523-74 для двигатели серий 4А и 4АН при $T_{сл} = 10\,000$ ч $R(T_{сл}) = 0,9$. Эти данные относятся к нормальной категории у

Таблица 13-4

Категория условий эксплуатации	$R(T_{нар})$	
	при $T_{нар} = 20\,000$ ч	при $T_{нар} = 10\,000$ ч
Легкая	0,85	0,977
Нормальная	0,65	0,877
Жесткая	0,45	0,696
Особо жесткая	0,20	0,358

ловий эксплуатации. При других условиях эксплуатации следует руководствоваться данными табл. 13-4, в которой приведены значения $R(T_{сл})$ для двигателей серии А2 мощностью от 0,12 до 100 кВт в зависимости от категории условий эксплуатации [150].

t — число часов работы двигателя в году.

S_y — удельный ущерб от простоев оборудования при выходе двигателя из строя, руб/кВт. Среднее значение S_y рекомендуется определять по табл. 13-5.

Таблица 13-5

P_2 , кВт	Усредненная длительность простоев, ч	S_y , руб/кВт
До 0,4	0,7	2,78
Свыше 0,4 до 2,8	1,0	2,10
Свыше 2,8 до 100	2,0	1,05

S_k , $S_{ср}$ и S_m — затраты на один капитальный, средний и мелкий ремонты соответственно [151], указаны в табл. 13-6. n_m и $n_{ср}$ — число мелких или средних ремонтов в год соответственно, определяемое в зависимости от защищенности и условий работы двигателя [15]. Если условия эксплуатации не оговорены, рекомендуется принимать для двигателей со степенью защиты IP44 $n_{ср} = 2$, $n_m = 4$; для двигателей со степенью защиты IP23/22 $n_{ср} = 3$, $n_m = 7,5$.

K_m и $K_{ср}$ — коэффициенты, характеризующие уменьшение потребного количества мелких и средних ремонтов в год соответственно благодаря повышению надежности новых машин. K_m и $K_{ср}$ — могут принимать значения от 1 до 0. Они устанавливаются экспертной оценкой значимости запроектированных мероприятий по повышению надежности.

Таблица 13-6

P_2 , кВт	Стоимость ремонта, руб.		
	S_M	S_{cp}	S_K
До 0,6	1,53	10,5	24,8
Свыше 0,6 до 3,0	1,98	13,65	32,2
Свыше 3,1 до 5,0	2,45	16,8	39,7
Свыше 5,1 до 10	3,22	22,05	52,1
Свыше 10,1 до 15	3,98	27,5	64,5
Свыше 15,1 до 20	4,74	32	77
Свыше 20,1 до 30	5,66	38,8	91,7
Свыше 30,1 до 40	6,74	46,2	109
Свыше 40,1 до 55	7,8	53,5	126,2
Свыше 55,1 до 75	9,17	63	148,5
Свыше 75,1 до 100	10,7	73,5	173,5

Примечание. $S_{cp}/S_M = 6,87$; $S_K/S_M = 16,2$; $S_K/S_{cp} = 2,36$.

Суммарные затраты на обслуживание в год, руб.,

$$C_0 = Z_{ам} + Z_{рем}. \quad (13-27)$$

13-5. ЗАТРАТЫ НА РАЗРАБОТКУ И ВНЕДРЕНИЕ

Общих нормативов затрат на разработку и внедрение пока нет. В каждом отдельном случае требуется составить смету расходов по статьям, перечисленным на эти цели в § 13-1.

По имеющимся данным [152], в электротехнической промышленности затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы составляют 3—3,3% годовой стоимости валовой продукции, а с учетом затрат на разработку технологии, изготовление оснастки, освоение производства, техническое перевооружение предприятий, связанных с выпуском новой продукции, до 8—9%.

На основании анализа ряда новых разработок можно для проектных расчетов сугубо приближенно принять, что затраты на разработку и внедрение серийных двигателей составляют 10% их полной себестоимости.

При подстановке затрат на разработку и внедрение в (13-7) их значения должны быть умножены на соответствующие коэффициенты приведения α_i (13-2).

13-6. ЗАТРАТЫ НА КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И НЕОБХОДИМЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПЛОЩАДИ

Затраты на компенсирующие устройства, руб., определяются по методике ВНИИЭМ:

$$C_r = C_r K_{max} \xi \frac{P_2}{\eta_{\xi}} (\operatorname{tg} \varphi_{\xi} - \operatorname{tg} \varphi_0) (1 + T_n p_0), \quad (13-28)$$

где C_r — стоимость 1 квар·ч компенсирующих устройств; $C_r = 13$ руб/(квар·ч); K_{max} — коэффициент участия электродвигателей в максимумах нагрузки в системе, $K_{max} = 0,25$; $\operatorname{tg} \varphi_{\xi} = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_{\xi})$; $\cos \varphi_{\xi}$ — коэффициент мощности при фактической загрузке; $\operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_0)$; $\cos \varphi_0$ — нейтральный коэффициент мощности*; T_n — нормативный срок окупаемости, лет; p_0 — относительные затраты на обслуживание, включая амортизационные отчисления.

Дополнительные потери, кВт, обусловленные потреблением дополнительной реактивной энергии,

$$P_r = p_r (\operatorname{tg} \varphi_{\xi} - \operatorname{tg} \varphi_0) \frac{P_2}{\eta_{\xi}}, \quad (13-29)$$

где p_r — удельные потери на генерирование и передачу 1 квар (в этом случае $p_r = 0,11$ кВт/квар) или удельные потери, связанные с компенсацией 1 квар посредством конденсаторных батарей (в этом случае $p_r = 0,085$ кВт/квар).

Величина P_r зависит от параметров и режима работы двигателей и может рассматриваться как их собственные потери. Суммарные потери двигателя, включая и эти дополнительные, называются приведенными, а к. п. д., подсчитанный с учетом этих потерь, — приведенным к. п. д.

$$\eta'_{\xi} = \frac{\eta_{\xi}}{1 + p_r (\operatorname{tg} \varphi_{\xi} - \operatorname{tg} \varphi_0)}. \quad (13-30)$$

Сопоставление значений приведенного к. п. д. дает возможность просто и однозначно сравнивать энергетические показатели двигателей одинаковой или близкой мощности.

* Нейтральным называется $\cos \varphi_0$, при котором потребитель не платит штрафа и не получает премии. Принято $\cos \varphi_0 = 0,9$.

Затраты на необходимые производственные площади $C_{\text{комп}}$, введенные в расчет для учета компактности двигателя, могут быть определены по рекомендациям, приведенным в гл. 3.

13-7. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА

При поисковых расчетах критерий оптимальности (суммарные затраты) может определяться по приближенной формуле

$$Z_T \approx K(C_d + C_r) + C_a T_n + C_{\text{комп}}, \quad (13-31)$$

где $K=1+T_n(p_{\text{ам}}+p_o)$ — коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления и затраты на обслуживание при эксплуатации; $p_{\text{ам}}$ — амортизационные отчисления ($p_{\text{ам}} \approx 0,065$); p_o — относительные затраты на обслуживание при эксплуатации ($p_o=0,069$); C_d — производственная себестоимость двигателя.

При расчете производственной себестоимости двигателя, когда отсутствуют точные данные по расходу и стоимости конструкционных материалов C_k и трудозатратам C_T , можно также воспользоваться упрощенными формулами, разработанными ВНИИЭМ для машин мощностью до 100 кВт:

$$C_k = [D_{a1}^2 K_{k1} (K_{k2} + D_{a1}) + K_{k3} D_{a1} l_1 (K_{k4} + D_{a1})] C_k; \quad (13-32)$$

Таблица 13-7

Степень защиты	Материал станины	Материал щитов	K_{k1}	K_{k2}	K_{k3}	K_{k4}	C_k' , руб/мг
IP44	Алюминиевый сплав	Алюминиевый сплав	2100	0	590	0,1	1,63
IP44	То же	Чугун	1970	0,354	590	0,1	1,00
IP44	Чугун	То же	2700	0,028	1060	0,19	0,67
IP23	То же	» »	1600	0,24	1060	0,19	0,67

где $K_{k1}, K_{k2}, K_{k3}, K_{k4}$ — конструктивные коэффициенты (табл. 13-7); C_k' — средневзвешенная цена конструкционных материалов (табл. 13-7);

$$C_T = [K_{T1} D_{a1}^2 (K_{T2} + l_1/D_{a1})], \quad (13-33)$$

где K_{T1} и K_{T2} — коэффициенты изготовления, $K_{T1}=500$; $K_{T2}=0,4$.

Глава четырнадцатая

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

14-1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Прогресс в электромашиностроении неразрывно связан с прогрессом в области электротехнических материалов [165]. Применение более совершенных материалов позволяет уменьшить габариты и массу двигателей при сохранении или даже улучшении их эксплуатационных характеристик, а также механизировать технологические процессы изготовления статора и ротора.

В табл. 14-1 приведены краткие характеристики основных электротехнических материалов, применяемых в двигателях единых серий с высотами оси вращения до 250 мм включительно.

а) Электротехническая сталь

В производстве асинхронных двигателей используются как горячекатаные, так и холоднокатаные электротехнические стали, причем последние ввиду явных преимуществ (см. § 2-2, а) находят все большее применение и постепенно вытесняют горячекатаные стали [166—168].

Холоднокатаные стали поставляются как в отожженном, так и в неотожженном состоянии. Первые не требуют специальной термообработки после штамповки. Отштампованные листы магнитопровода из холоднокатаной стали, поставляемой в неотожженном состоянии, подвергаются специальной термообработке.

Все электротехнические стали в той или иной степени обладают магнитной анизотропией. Горячекатаные стали имеют незначительную магнитную анизотропию. В холоднокатаных сталях анизотропия выражена значительно сильнее. Например, разница между наибольшим и наименьшим значениями магнитной индукции при напряженности поля 2500 А/м для горячекатаной стали марки 1212 не превышает 0,04 Тл, а для стали 2013 доходит до 0,17 Тл.

Для учета магнитной анизотропии ГОСТ 12119-66 предусматривает методы определения магнитных характеристик как на полосовых образцах, 50% полосок которых вырезается вдоль, а 50% — поперек прокатки стали, так и на кольцевых. В практике технических магнитных измерений принят метод определения магнитных харак-

Краткая характеристика материалов, применяемых в двигателях единых серий

Материал	А и АО		А2 и АО2 с высотой оси вращения, мм		4А с высотой оси вращения, мм	
			до 160		до 160	
Электротехническая сталь	Горячекатаная листовая марки 1211, $B_{2500} = 1,53$ Тл, $P_{1,0/50} = 3,3$ Вт/кг				Холоднокатаная рудонная марки 2013, $B_{2500} = 1,65$, $P_{1,0/50} = 2,5$ Вт/кг	
Обмоточный провод	ПЭЛБО с эмалево-хлопчатобумажной изоляцией только для ручной намотки; средняя двусторонняя толщина изоляции 0,17—0,22 мм		ПЭТВ с эмалевой изоляцией только для ручной намотки, средняя двусторонняя толщина изоляции 0,02—0,1 мм		ПЭТВМ с эмалевой изоляцией для ручной и механизированной намотки, средняя двусторонняя толщина изоляции 0,048—0,088 мм	
					ПЭТМ с эмалевой изоляцией для ручной и механизированной намотки, средняя двусторонняя толщина изоляции 0,07—0,08 мм	
					Холоднокатаная рудонная марки 2212, $B_{2500} = 1,60$ Тл, $P_{1,0/50} = 2,2$ Вт/кг	

Продолжение табл. 14-1

Краткая характеристика материалов, применяемых в двигателях единых серий				
Материал	А и АО	А2 и АО2 с высотой оси вращения, мм		4А с высотой оси вращения, мм
		до 160	свыше 160	до 160
Изоляционные материалы	Картон электроизоляционный в сочетании с лаковыми; только для ручной намотки; общая толщина 0,6 мм	Пленкоэлектротон, только для ручной намотки; толщина 0,27 мм	Пленкоэлектротон в сочетании со стеклотканями и стеклотканями, толщиной для ручной намотки; общая толщина 0,55 мм	Для ручной и механизированной намотки пленко-синтокартон, толщина 0,4 мм
				Для ручной и механизированной намотки пленко-синтокартон, толщина 0,2—0,3 мм
Пропиточный состав	Маслянобитумные или водоэмульсионные лаки для пропитки окунанием	Составы без растворителей типа КП для пропитки на автоматах струйного полива		
		Класс нагревостойкости системы изоляции		
	А	А	В	В
				Ф

геристик на полосовых образцах (ГОСТ 21427.0-75—21427.3-75). Для горячекатаных сталей магнитные характеристики, снятые как на полосовых, так и на кольцевых образцах, практически совпадают, поэтому для этих сталей вполне допустим метод «полосовых образцов». Для холоднокатаных сталей такого совпадения характеристик не наблюдается. Чем сильнее выражена анизотропия, тем больше различие между магнитными характеристиками, измеренными на полосовых и кольцевых образцах. Определение магнитных характеристик на полосовых образцах менее трудоемко, в связи с чем целесообразно, используя метод, изложенный в [169], получать на полосовых образцах магнитные характеристики холоднокатаных сталей, аналогичные характеристикам, снятым на кольцевых образцах.

Сущность метода состоит в том, что предварительно определяют основные кривые намагничивания и удельных потерь в стали на полосовых образцах, вырезанных вдоль и под углом 55—60° к направлению прокатки. С помощью этих кривых строятся эквивалентные кривые намагничивания и удельных потерь по выражениям: для кривой намагничивания

$$H_{\text{ЭК}} = \frac{1}{3} (H_0 + 2H_{60}); \quad (14-1)$$

для удельных потерь

$$P_{\text{ЭК}} = \frac{1}{3} (P_0 + 2P_{60}), \quad (14-2)$$

где H_0 , H_{60} — значения напряженности поля при данной магнитной индукции и намагничивании образцов стали под углами к направлению прокатки 0 и 60°; P_0 , P_{60} — удельные потери при данном значении магнитной индукции и намагничивании образцов стали под углами к направлению прокатки 0 и 60°.

Технология изготовления сердечников в значительной степени влияет на магнитные свойства сталей и как следствие на магнитные характеристики магнитопровода. Анализ технологических операций показывает, что значительное увеличение потерь в стали (до 40%) вызывают заусенцы, образующиеся при штамповке листов [5]. Для ограничения потерь технической документацией на двигатели серии 4А предусмотрены максимально допустимые заусенцы, равные 50 мк. Увеличение потерь в стали от наклепа, измеренное на полосовых образцах с размерами 30×280 мм и толщиной 0,35—0,5 мм, составляет примерно 10% [168]. В более узких полосах с шириной, соизмеримой с шириной зубцов статора, потери от наклепа увеличиваются в еще большей степени.

Для снятия наклепа листы сердечника двигателя подвергаются термообработке. В двигателях отрезка серии 4А с высотами оси вращения до 160 мм, где применяется сталь марки 2013, эта операция включена в общий процесс термообработки листов после штамповки.

Вследствие нарушения межлистовой изоляции при чрезмерных усилиях спрессовки сердечника повышаются потери от вихревых токов. Так, из-за повреждения межлистовой изоляции и наличия заусенцев потери в стали могут увеличиваться до 65% [5]. Ухудшение магнитных свойств вызывает и такие технологические операции, как

марка или приварка скоб для скрепления сердечника и механическая обработка его поверхностей.

Для двигателей серии 4А с высотами оси вращения до 250 мм применены две марки холоднокатаных сталей: нелегированная сталь марки 2013 в двигателях с высотами оси вращения до 160 мм и слаболегированная сталь марки 2212 в двигателях с высотами оси вращения 180—250 мм. Сталь марки 2013 поставляется в неотожженном (нагартованном) состоянии и требует отжига после штамповки, сталь марки 2212 — в отожженном состоянии и отжига после штамповки не требует.

Выбор марок стали обусловлен как технико-экономическими соображениями (гл. 2), так и технологическими — отжиг листов стали большого диаметра ($D_{\text{ал}} > 300$ мм) приводит к недопустимой деформации.

Поставка стали марки 2013 в неотожженном состоянии обеспечивает удовлетворительную штампуемость, однако магнитные свойства при этом не регламентируются и находятся на низком уровне, поэтому листы подвергаются специальной термообработке (отжигу), в которой в стали происходят процессы рекристаллизации и снятия упругих напряжений. При этом магнитные свойства стали повышаются до уровня, соответствующего ГОСТ 21427.2-75.

В процессе термообработки на поверхности листов одновременно образуется оксидная пленка толщиной 50 мкм с сопротивлением не менее 1 Ом·см², которая служит межлистовой изоляцией.

Сталь марки 2212 поставляется с электроизоляционным покрытием и в состоянии поставки обеспечивает удовлетворительную штампуемость.

Химический состав стали марок 2013 и 2212 приведен в табл. 14-2.

В табл. 14-3 приведены основные характеристики сталей марок 2013 и 2212 толщиной 0,5 мм. Там же приводятся для сравнения характеристики горячекатаной стали марки 1211, применявшейся в двигателях серий А и АО. Применение холоднокатаных сталей вместо горячекатаных в двигателях серии 4А с высотами оси вращения до 250 мм позволило снизить расход стали на 10—15%, а массу конструктивных деталей — на 5—7%.

В табл. 14-4, 14-5 даны основные характеристики намагничивания сталей марок 2013 и 2212 соответственно.

Таблица 14-2

Марка стали	Примеси, %				
	Углерод	Кремний	Марганец	Алюминий	Фосфор
2013	До 0,03	До 0,4	0,2—0,4	До 0,1	До 0,02
2212	До 0,06	До 1,0	0,2—0,4	До 0,1	До 0,1

1. Электроизоляционные материалы и провода

Все электроизоляционные материалы и провода, применяемые при изготовлении обмоток асинхронных двигателей, можно подразделить на пять основных групп: электроизоляционные материалы; обмоточные провода;

Таблица 14.3

Наименование	Марка стали		
	2013	2212	1211
Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля 2500 А/м	1,65	1,6	1,53
Удельные потери при индукции 1,0 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц, Вт/кг	2,5	2,2	3,3
То же, но при индукции 1,5 Тл, Вт/кг	5,6	5,0	7,7
Коэффициент заполнения сердечника сталью	0,97	0,97	0,93
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	$0,14 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$0,24 \cdot 10^{-6}$
Плотность, кг/м ³	7850	7800	7750
Отклонение по толщине, мм, для стали нормальной точности	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$
Разнотолщинность, мм	0,04	0,04	0,08
Вид поставки	Листы, рулон, резаная лента	Листы, рулон, резаная лента	Листы
Вид электроизоляционного покрытия	Оксидная пленка	Органическое	Оксидная пленка или лак

пазовая и междофазовая изоляция;
пропиточные и покровные составы;
выводные провода;
электроизоляционные трубки, материалы для заклиновки и бандажировки.

К электроизоляционным материалам и проводам предъявляются требования, выполнение которых обеспечивает надежную работу машины в течение заданного срока службы при минимальных затратах [170]. Одним из основных требований является необходимость нагревостойкость материала. В соответствии с ГОСТ 8865-70 нагревостойкость — это способность электроизоляционных материалов пропитывающих составов и изоляции проводов без повреждения без существенного ухудшения практически важных свойств длительно выдерживать воздействие повышенной против нормальной температуры.

Таблица 14.4

В, Гц	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
10	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64
	0,79	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,83	0,84	0,86	0,87
100	0,641	0,642	0,643	0,644	0,645	0,646	0,647	0,648	0,649	0,65
	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,941	0,942
1000	0,651	0,652	0,653	0,654	0,66	0,67	0,675	0,68	0,689	0,69
	0,943	0,945	0,946	0,947	0,948	0,949	0,95	0,96	0,97	0,99
10000	0,70	0,71	0,72	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,795	0,797
	0,995	0,998	1,0	1,0	1,002	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
100000	0,799	0,80	0,81	0,815	0,817	0,818	0,82	0,825	0,83	0,84
	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,12	1,13	1,15	1,18	1,19
1000000	0,86	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,97	0,99
	1,20	1,21	1,25	1,30	1,35	1,38	1,40	1,41	1,45	1,50
10000000	1,00	1,01	1,04	1,10	1,15	1,18	1,20	1,25	1,30	1,38
	1,55	1,58	1,60	1,62	1,66	1,70	1,75	1,80	1,82	1,90
100000000	1,40	1,48	1,55	1,57	1,60	1,72	1,76	1,80	1,90	2,00
	1,98	2,00	2,01	2,10	2,15	2,25	2,30	2,40	2,50	2,58
1000000000	2,05	2,10	2,20	2,30	2,40	2,45	2,50	2,60	2,80	2,90
	2,62	2,70	2,90	3,00	3,10	3,25	3,30	3,40	3,50	3,70
10000000000	2,94	3,08	3,20	3,30	3,5	3,62	3,80	3,90	4,14	4,38
	3,90	4,00	4,20	4,30	4,60	4,70	5,00	5,20	5,40	5,60
100000000000	4,60	4,84	5,10	5,34	5,65	6,0	6,3	6,65	7,00	7,40
	5,98	6,20	6,60	6,90	7,40	7,80	8,30	9,00	9,80	10,80
1000000000000	7,80	8,20	8,70	9,30	10,0	10,6	11,4	12,0	12,8	13,9
	12,0	13,0	14,20	15,20	16,40	17,80	19,20	21,0	22,80	25,0
10000000000000	14,9	16,0	17,2	18,0	22,0	25,00	28,0	30,4	32,8	35,0
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100000000000000	37,6	40,4	42,6	45	47,0	50	54,8	59	63,8	69,6
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000000000000000	75	79	84,5	83,4	94,0	100	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. В числителе указана напряженность магнитного поля при измерении на полосовых образцах, в знаменателе — на кольцевых образцах.

Таблица 14

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
0,40	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,86	0,90
0,50	0,91	0,96	0,98	1,00	1,02	1,03	1,05	1,08	1,10	1,11
0,60	1,18	1,20	1,21	1,23	1,24	1,25	1,27	1,28	1,30	1,31
0,70	1,38	1,39	1,40	1,41	1,45	1,48	1,50	1,53	1,56	1,59
0,80	1,62	1,65	1,70	1,75	1,77	1,78	1,81	1,85	1,88	2,00
0,90	2,02	2,08	2,10	2,18	2,21	2,28	2,35	2,40	2,50	2,50
1,00	2,60	2,68	2,75	2,80	2,90	2,98	3,08	3,12	3,20	3,30
1,10	3,40	3,50	3,58	3,70	3,80	3,90	4,00	4,10	4,30	4,40
1,20	4,50	4,70	4,90	5,10	5,25	5,45	5,60	5,8	6,00	6,30
1,30	6,42	6,65	6,90	7,20	7,50	7,75	8,00	8,23	8,60	8,9
1,40	9,22	9,60	10,00	10,30	10,70	11,10	11,55	12,00	12,50	13,10
1,50	13,62	14,20	14,80	15,55	16,40	17,40	18,20	19,20	20,40	22,00
1,60	25,0	28,0	31,4	34,2	38,2	41,5	44,6	47,8	50,0	54,0
1,70	64,0	72	78	84	88	92	96	100	—	—

Примечание. Измерения проведены на полосовых образцах.

Другим не менее важным требованием является необходимостью электрическая прочность изоляционных материалов в диапазоне рабочих температур при воздействии факторов окружающей среды. Анализ отказов электрических машин в эксплуатации показывает, что наибольший процент отказов происходит по вине обмотки (см. гл. 11), поэтому одним из важнейших требований к обмоточным проводам (особенно с эмалевой изоляцией) является требование к долговечности изоляции провода в исходном состоянии и после технологических воздействий.

К изоляции предъявляются также определенные требования в части механических параметров, обеспечивающих достаточную технологичность материала, сохранение его электрической прочности после воздействий в процессе изготовления двигателя, так и при вибрационных и ударных нагрузках, истираниях, изгибающих усилиях, возникающих при эксплуатации двигателя. Особые требования к механическим характеристикам материалов предъявляются при механизированном способе изготовления обмотки. Так, материалы для пазовой изоляции должны поставляться в рулонах, иметь достаточную жесткость и прочность, должны быть равномерными по толщине. Обмоточные провода должны обладать большей эластичностью и прочностью изоляции на истирание, чем провода, применяющиеся при ручной укладке обмотки. Кроме того, необходимо, чтобы провод с непрерывной длиной на катушке или в контейнере имел массу 20—180 кг (в зависимости от диаметра), в противном случае производительность автомата значительно снижается из-за частой его переналадки на новую катушку.

Кроме указанных выше требований, изоляционные материалы должны иметь максимально высокую теплопроводность.

В случае, если двигатель предназначен для эксплуатации в специальных условиях, к изоляционным материалам, проводам, пропитывающим составам и покрывным эмалям предъявляются дополнительные требования, как, например, по влагостойкости, стойкости

воздействиям морского тумана и плесневых грибов, холодоустойчивости, химостойкости и т. д.

Непременным условием является совместимость всех материалов, из которых изготавливается система изоляции двигателя.

Обмоточные провода

Обмоточные провода изготавливаются с эмалевой, эмаль-волоконистой или волокнистой изоляцией. В двигателях современных серий применяются в основном провода с высокопрочной эмалевой изоляцией [165, 171, 172].

Применение таких проводов более эффективно, так как толщина их изоляционного слоя в 1,5—3 раза меньше, чем провода с волокнистой изоляцией. Кроме того, эмалевая изоляция более теплопроводна, чем волокнистая изоляция, и обладает высокой влагостойкостью. Изоляция проводов в зависимости от состава лака может иметь классы нагревостойкости В, F и H. В настоящее время выпускается несколько марок медных эмалированных проводов: ПЭТВ, ПЭТВМ с изоляцией на основе полиэфиров, ПЭТ-155, ПЭТ-имид с изоляцией на полиэфиримидной основе, ПЭТМ с полиэфирамидной изоляцией.

В двигателях серии 4А применяются провода марок ПЭТВ, ПЭТВМ (класс нагревостойкости В) и ПЭТ155, ПЭТМ (класс нагревостойкости F). Провода марок ПЭТВ и ПЭТ155 были разработаны ранее проводов марок ПЭТВМ и ПЭТМ и применяются только при ручной укладке обмотки. Провода марок ПЭТВМ и ПЭТМ применяются в основном при механизированном способе укладки.

Основные характеристики этих проводов с размерами, применяемыми в сериях асинхронных двигателей, даны в табл. 14-6 и 14-7.

В двигателях специального назначения с повышенным сроком службы находят применение провода марок ПСД и ПСДК со стекловолокнистой изоляцией нормальной толщины (0,23—0,33 мм), марок ПСДТ и ПСДКТ с тонкой изоляцией (0,18—0,23 мм), но с меньшими значениями электрической и механической прочности (табл. 14-6, 14-7).

Пазовая и междуфазовая изоляция

В современных сериях двигателей широкое распространение получили композиционные материалы [165, 173—178], представляющие собой сочетание полимерных пленок с различными гибкими электроизоляционными материалами на основе синтетических органических или неорганических волокон, причем указанные компоненты связаны между собой клеящими составами. Пленка принимает на себя основную электрическую и механическую нагрузки, в то время как другие компоненты выполняют функции армирующего материала, обеспечивающего необходимые технологические свойства композиции — жесткость, упругость, повышенную стойкость к механическим воздействиям и др.

Одной из важных функций волокнистых подложек является обеспечение надежной связи между поверхностями пазовой изоляции прилегающими к ним катушками обмотки и сердечником за счет лучшей смачиваемости волокнистых материалов пропиточными составами по сравнению с пленками. При известных сочетаниях армирующие материалы и подложки могут оказывать существенное влияние на повышение нагревостойкости композиционного материала.

Таблица 14-6Б

Номинальный диаметр про- волки, мм	ПЭТВ	ПЭТ-155	ПЭТВ	ПЭТВ	Эмалированные провода										Номинальный диаметр про- волки, мм				
					ПЭТВ		ПЭТВ		ПЭТВ		ПЭТВ		ПЭТВ						
					Максималь- ный диаметр провода, мм	Пробное напряжение, кВ	Максималь- ный диаметр провода, мм	Пробное напряжение, кВ	Максималь- ный диаметр провода, мм	Пробное напряжение, кВ	Максималь- ный диаметр провода, мм	Пробное напряжение, кВ	Максималь- ный диаметр провода, мм	Пробное напряжение, кВ					
0,2	0,240	1,7	0,240	1,6	—	—	—	—	—	—	—	0,31	0,55	0,4	0,50	0,3	0,46	0,3	0,3
0,210	0,250	2,2	0,260	2,0	—	—	—	—	—	—	—	0,33	0,57	0,4	0,52	0,3	0,48	0,3	0,3
0,224	0,280	2,2	0,270	2,0	—	—	—	—	—	—	—	0,35	0,59	0,4	0,54	0,3	0,50	0,3	0,3
0,236	0,286	2,2	0,285	2,0	—	—	—	—	—	—	—	0,38	0,62	0,4	0,57	0,3	0,53	0,3	0,3
0,25	0,300	2,2	0,300	2,0	0,310	2,7	0,310	2,7	0,310	2,7	0,310	0,41	0,65	0,4	0,60	0,3	0,56	0,3	0,3
0,265	0,315	2,2	0,315	2,2	0,325	2,7	0,325	2,7	0,325	2,7	0,325	0,44	0,68	0,4	0,63	0,3	0,59	0,3	0,3
0,28	0,330	2,2	0,330	2,2	0,340	2,7	0,340	2,7	0,340	2,7	0,340	0,47	0,71	0,4	0,66	0,3	0,62	0,3	0,3
0,30	0,350	2,2	0,350	2,2	0,360	2,7	0,360	2,7	0,360	2,7	0,360	0,49	0,73	0,4	0,68	0,3	0,64	0,3	0,3
0,315	0,370	2,4	0,365	2,4	0,375	2,7	0,375	2,7	0,375	2,7	0,375	0,51	0,77	0,4	0,71	0,3	0,68	0,3	0,3
0,335	0,385	2,4	0,385	2,4	0,395	2,7	0,395	2,7	0,395	2,7	0,395	0,53	0,79	0,4	0,73	0,3	0,70	0,3	0,3
0,355	0,420	2,4	0,405	2,4	0,425	2,7	0,425	2,7	0,425	2,7	0,425	0,55	0,81	0,4	0,75	0,3	0,72	0,3	0,3
0,380	0,440	2,4	0,440	2,4	0,450	3,1	0,450	3,1	0,450	3,1	0,450	0,57	0,83	0,4	0,77	0,3	0,74	0,3	0,3
0,40	0,460	2,4	0,460	2,4	0,470	3,1	0,470	3,1	0,470	3,1	0,470	0,59	0,85	0,4	0,79	0,3	0,76	0,3	0,3
0,425	0,485	2,8	0,490	3,1	0,495	3,1	0,495	3,1	0,495	3,1	0,495	0,62	0,88	0,4	0,82	0,3	0,79	0,3	0,3
0,45	0,510	2,8	0,520	3,1	0,520	3,1	0,520	3,1	0,520	3,1	0,520	0,64	0,90	0,4	0,84	0,3	0,81	0,3	0,3
0,475	0,535	3,1	0,545	3,1	0,545	3,1	0,545	3,1	0,545	3,1	0,545	0,67	0,93	0,4	0,87	0,3	0,84	0,3	0,3
0,50	0,560	3,1	0,560	3,1	0,560	3,1	0,560	3,1	0,560	3,1	0,560	0,69	0,95	0,4	0,89	0,3	0,86	0,3	0,3

0.56	0.630	3.5	0.630	3.2	0.630	3.0	0.58	1.2	0.72	0.99	0.4	0.94	0.35	0.99	0.4	0.90	0.3
0.60	0.670	3.5	0.670	3.2	0.640	3.6	—	—	0.74	1.01	0.4	0.96	0.35	1.01	0.4	0.92	0.3
0.63	0.700	3.5	0.680	3.2	0.680	4.1	—	—	0.77	1.04	0.4	0.99	0.35	1.04	0.4	0.95	0.3
0.67	0.750	3.5	0.710	3.2	0.720	4.1	—	—	0.80	1.07	0.4	1.02	0.35	1.07	0.4	0.98	0.3
0.69	0.770	3.5	0.750	3.2	0.760	4.1	0.720	1.5	0.83	1.10	0.4	1.05	0.33	1.10	0.4	1.01	0.3
			0.770	3.2	0.780	4.1	—	—	0.86	1.13	0.4	1.08	0.35	1.13	0.4	1.04	0.3
0.71	0.790	3.5	0.800	3.2	0.800	4.1	—	—	0.90	1.17	0.4	1.12	0.35	1.17	0.4	1.08	0.3
0.75	0.840	3.5	0.840	3.3	0.840	4.1	—	—	0.93	1.20	0.4	1.15	0.35	1.20	0.4	1.11	0.3
0.770	0.860	3.5	0.850	3.3	0.860	4.3	—	—	0.96	1.23	0.4	1.18	0.35	1.23	0.4	1.14	0.3
0.80	0.890	3.5	0.890	3.3	0.890	4.3	0.890	3.7	1.00	1.29	0.45	1.23	0.35	1.29	0.45	1.20	0.3
0.830	0.920	3.5	0.920	3.3	0.920	4.3	—	—	1.04	1.33	0.45	1.27	0.35	1.33	0.45	1.24	0.3
0.85	0.940	3.7	0.940	3.3	0.940	4.3	0.940	3.7	1.08	1.37	0.45	1.31	0.35	1.37	0.45	1.28	0.3
0.90	0.990	3.7	0.990	3.7	0.990	4.3	0.990	3.7	1.12	1.41	0.45	1.35	0.35	1.41	0.45	1.32	0.3
0.930	1.020	3.7	1.020	3.7	1.020	4.3	—	—	1.16	1.45	0.45	1.39	0.35	1.45	0.45	1.36	0.3
0.95	1.040	3.7	1.040	3.7	1.040	4.3	1.040	3.7	1.20	1.49	0.45	1.43	0.35	1.49	0.45	1.40	0.3
1.00	1.110	3.9	1.090	3.8	1.110	4.4	1.110	3.8	1.25	1.54	0.45	1.48	0.35	1.54	0.45	1.45	0.3
1.06	1.170	3.9	1.160	3.8	1.170	4.4	1.170	3.8	1.30	1.59	0.45	1.53	0.35	1.59	0.45	1.50	0.3
1.08	1.190	3.9	1.180	3.8	1.190	4.4	1.200	3.8	1.35	1.64	0.45	1.58	0.35	1.64	0.45	1.55	0.3
1.12	1.230	3.9	1.220	3.8	1.230	4.4	1.230	3.8	1.40	1.69	0.45	1.63	0.35	1.69	0.45	1.60	0.3
1.18	1.290	3.9	1.280	3.9	1.290	4.6	1.290	3.9	1.45	1.74	0.45	1.68	0.35	1.74	0.45	1.65	0.3
1.25	1.360	3.9	1.350	3.9	1.360	4.6	1.360	3.9	1.50	1.79	0.45	1.73	0.35	1.79	0.45	1.70	0.3
1.32	1.430	3.9	1.420	3.9	1.430	4.6	1.430	3.9	1.56	1.85	0.45	1.79	0.35	1.85	0.45	1.76	0.300
1.40	1.510	4.0	1.510	4.2	1.540	4.6	—	—	1.62	1.91	0.45	1.87	0.4	1.91	0.45	1.86	0.35
1.45	1.560	4.0	1.560	4.2	—	—	—	—	1.68	1.97	0.45	1.93	0.4	1.97	0.45	1.92	0.35
1.50	1.610	4.0	1.610	4.2	—	—	—	—	1.74	2.03	0.45	1.99	0.4	2.03	0.45	1.98	0.35
1.56	1.670	4.0	1.670	4.2	—	—	—	—	1.81	2.10	0.45	2.06	0.4	2.10	0.45	2.05	0.35
1.60	1.710	4.4	1.710	4.2	—	—	—	—	1.88	2.17	0.45	2.13	0.4	2.17	0.45	2.12	0.35

403

Номинальный диаметр проволоки, мм	ПЭ ТВ	ПЭТ-155	ПЭТМ	ПЭТМ	Эмалированные провода												ПЭД	ПЭДТ	ПЭДК	ПЭДКТ	Класс нагревостойкости Н
					Изоляция со стекловолоконистой оплеткой																
					Класс нагревостойкости F																
					Класс нагревостойкости Н																
Номинальный диаметр проволоки, мм	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм	Пробное напряжение, кВ	Максимальный диаметр проволоки, мм		
1,70	1,810	4,4	1,810	4,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
1,80	1,920	4,4	1,920	4,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
1,90	2,020	4,4	2,020	4,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,00	2,120	4,4	2,120	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,12	2,250	4,4	2,240	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,24	2,370	4,4	2,370	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,36	2,490	4,4	2,490	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,44	2,570	4,0	2,570	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,50	2,630	4,4	2,630	4,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

Параметр

Параметр	Число возвратно-поступательных ходов иглы диаметром*				Число возвратно-поступательных ходов иглы диаметром*			
	0,4 мм				0,6 мм			
Стойкость изоляции к истиранию по ГОСТ 14340.10-69 и 15634.2-70	40/16	40/16	40/16	30—50** 15—25	70—150** 40—110	50—110** 30—85	15—70** 10—45	8—20** 8—15
	Отношение диаметра стержня наливки к диаметру провода ***				Отношение диаметра стержня наливки к диаметру провода ***			
Эластичность в исходном состоянии по ГОСТ 14340.3-69 и 15634.3-70	1	1	1	1	1	4	5	5
	0,38—0,69	0,38—1,56	0,38—1,56	Все размеры по табл. 14-6	Все размеры по табл. 14-6	Все размеры по табл. 14-6	0,31—1,56	0,31—1,56
	1	1	1	—	—	—	8	8
	0,71—1,25	1,60—2,00	1,60—2,00	—	—	—	>1,56	>1,56
	1	1	1	—	—	—	—	—
	1,32—1,70	—	—	—	—	—	—	—
	2	2	2	—	—	—	—	—
	1,80—2,24	2,12—2,50	2,12—2,50	—	—	—	—	—

* Числитель — среднее число двойных ходов, знаменатель — минимальное число двойных ходов.
 ** Зависит от диаметра провода.

*** Числитель — отношение диаметров стержня и провода, знаменатель — диапазон диаметров провода, удовлетворяющих данному отношению, мм.

Таблица 14-8

Материал	Марка	Номинальная толщина, мм	Предельные отклонения по толщине, мм	Пробивное напряжение в исходном состоянии, кВ	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	Предел прочности при растяжении, Па	Класс нагревостойкости	ТУ или ГОСТ
Пленко-синто-картон	ПСК-Ф ПСК-ЛП	0,22—0,47 0,25—0,52	$\pm(0,03-0,05)$ $\pm(0,03-0,05)$	10—20 10—20	$1 \cdot 10^{12}$ $1 \cdot 10^{12}$	$6-8 \cdot 10^7$ $(6-8) \cdot 10^7$	F B	ТУ ОЯД 503.034-77 ТУ 16.503.184-76
Пленки	Полиэтилентерефталатная ПЭТФ Полиимидная А, Б Фторопластовая: Ф-4 ЭО Ф-4ЭН	0,19; 0,25 0,05 0,04;	$\pm(0,02-0,03)$ $\pm(0,005-0,008)$	1,1—20,0 7,0	$1 \cdot 10^{14}$ $1 \cdot 10^{14}$	$(1,4-1,6) \cdot 10^8$ $(1,5-1,8) \cdot 10^8$	B B	ТУ 6-05-1974-76
		0,06	$\pm(0,04-0,08)$	4,0—10,8	$1 \cdot 10^{16}$	$(1,0-1,2) \cdot 10^8$	H	ТУ 6-19-121-79
		0,01—0,1	$\pm(0,002-0,005)$	1,6—16		$5 \cdot 10^7$	H	ГОСТ 12508-73
		0,02—0,15	$\pm(0,005-0,01)$	1,2—9,0		$1,6 \cdot 10^7$	H	ГОСТ 12508-73
Пленко-каско-слодо-пласт	ГИП-ЛСП-ПЛ	0,35; 0,40; 0,45	$\pm(0,04-0,05)$	11,0—12,5	$1 \cdot 10^{12}$	—	F	ТУ 16.503.089-75
Пленко-асбокартон	—	0,3; 0,35	$\pm 0,03$	6,0—8,75	$1 \cdot 10^{11}$	—	B	ТУ 16.503.044-72

Композиционные материалы обладают достаточно высокими механическими свойствами, они поставляются в рулонах, в связи с чем могут быть использованы при механизированном способе укладки обмотки. Из отечественных материалов подобного типа можно назвать пленкосинтокартаны марок ПСК-Ф, ПСК-ЛП (табл. 14-8). Материалы состоят из полиэтилентерефталатной пленки (пленки ПЭТФ), оклеенной с двух сторон либо бумагой из фенилонового волокна (ПСК-Ф), либо бумагой из лавсанового волокна без пропитки (ПСК-Л) или с пропиткой (ПСК-ЛП).

В двигателях серии 4А с высотами оси вращения 56—132 мм в качестве пазовой изоляции применяется пленка ПЭТФ, обладающая высокими электрическими и механическими свойствами, влагостойкостью, стойкостью к растворителям пропиточных лаков, к воздействию кислот невысокой концентрации, к плесени. Кроме того, широкое распространение пленки ПЭТФ объясняется возможностью механизации изолировки пазов вследствие достаточной жесткости, умеренного сопротивления к надрыву, поставки в рулонах и относительно низкой стоимости. Пленки в основном применяются в системах изоляции класса нагревостойкости В. Для систем изоляции на рабочую температуру до 200—220°С применяется полиимидная пленка, сочетающая высокую нагревостойкость с хорошими электрическими и механическими свойствами (табл. 14-8). Недостатком этой пленки является ее относительно высокая стоимость, поэтому она не находит применения в машинах массового выпуска.

В асинхронных двигателях узкоспециализированных исполнений (например, для работы во фреоновых компрессорах) в качестве материала пазовой и междуфазовой изоляции находит применение фторопластовая (политетрафторэтиленовая) пленка (табл. 14-8). Она имеет высокую влагостойкость, стойкость к растворителям и химически активным средам. Нагревостойкость ее доходит до 250°С. Однако фторопластовые пленки мягки и обладают холодной текучестью, вследствие чего их рекомендуется применять либо в сочетании с другими материалами (электрокартоном, пленкой ПЭТФ и т. п.), либо в конструкциях, где изоляция не подвергается воздействию значительных давлений.

Для прокладок в лобовых частях применяют материалы, поверхность которых имеет повышенный коэффициент трения. В двигателях серии 4А для этих целей используют пленкокаскослодопласт и пленкоасбокартон (табл. 14-8).

В двигателях серии ЧА160-250 при ручной укладке обмотки в качестве одного из материалов пазовой и междуфазовой изоляции применяют пленкокаскослодопласт марки ГИП-ЛСП-ПЛ (табл. 14-8). Это композиционный материал, состоящий из одного слоя флогового слоудопласта, оклеенного с одной стороны стеклолаковой и с другой — пленкой ПЭТФ. В качестве склеивающего материала применен полиэфирноэпоксидный лак. Пленкокаскослодопласт относится к классу нагревостойкости F, обладает достаточной влагостойкостью и химостойкостью. Существенным недостатком этого материала является его недостаточная прочность к надрыву, в связи с чем пазовые коробочки из пленкокаскослодопласта необходимо обклеивать с торцов прочными липкими полиэтилентерефталатными стеклотканевыми лентами. Другим недостатком является невозможность его применения при механизированном способе изолировки пазов.

Параметры	МЛ-92	ПЭ-993	КО-916К	Б-ИД-9127	КП-34	КП-50	ЭКД-14
Вязкость по ВЗ-4 при $20 \pm \pm 0,5^\circ \text{C}$, с	не менее 25	40—110	45—65	30—100, до-пускается до 180 с в течение гарантийного срока хранения	50—110	100—160	—
Вязкость по ВЗ-1 при $20 \pm \pm 0,5^\circ \text{C}$, с	—	—	—	—	—	—	60—300
Содержание сухого остатка, %	50—55	50 ± 2	66 ± 2	—	—	—	—
Термопластичность лаковой пленки, ч, не менее *	$\frac{48}{150}$	$\frac{50}{150 \pm 2^\circ \text{C}}$	$\frac{50}{200}$	—	—	—	50
Продолжительность высу-хания пленки при температу-ре $100 \pm 2^\circ \text{C}$, ч, не более *	$\frac{60}{105—110}$	$\frac{30}{130 \pm 2^\circ \text{C}}$	$\frac{15}{200 \pm 3^\circ \text{C}}$	$\frac{4}{120 \pm 2^\circ \text{C}}$	$\frac{30}{125 \pm 2^\circ \text{C}}$	$\frac{10}{125 \pm 5^\circ \text{C}}$	$\frac{15}{160 \pm 5^\circ \text{C}}$

* — для в таблице указаны при тем-пературе $^\circ \text{C}$, ч, не более *

Электрическая прочность, кВ/мм, не менее:	110—120	130±2 C	125±2°C	125±5°C	160±5°C
а) при $20 \pm 2^\circ \text{C}$	65	—	—	—	20
б) при $15—35^\circ \text{C}$ и отно-сительной влажности 45—75 %	—	80	25	—	—
в) в трансформаторном масле при $20 \pm 2^\circ \text{C}$	—	—	22	25	—
Класс нагревостойкости	В	В и F	В и F	В и F	F

* В числителе указано время (мин, ч), в знаменателе — температура, $^\circ \text{C}$.

Электроизоляционные пропиточные лаки представляют собой жидкие составы, состоящие из пленкообразующих веществ, растворителя и различных добавок, ускоряющих отверждение лака и придающих лаковой пленке соответствующую эластичность. В двигателях современных серий широкое применение находят пропиточные составы без растворителей [179—181]. Преимущество этих составов состоит в том, что процесс их полимеризации протекает в течение 15—30 мин, в то время как полимеризация основы лаков с растворителями требует 8—10 ч. Поскольку лаки с растворителями содержат до 50% смолы (основы), а без растворителей — около 100%, заполнение обмоток смолой при применении последних в 2 раза больше, чем при пропитке лаками с растворителями, т.е. улучшается качество пропитки, увеличивается теплопроводность системы изоляции, повышается надежность обмотки.

Для пропитки обмоток двигателей серии 4А применяются следующие составы: алкидомеламиновый МЛ92, полиэфирноизоциануратный ПЭ993, полиорганосилоксановый (модифицированный полиэфиром) КО-916К, полиэфирный КП-50, полиэфирный модифицированный полиорганосилоксаном КП-34, полиэфиримидный Б-ИД 01 и эпоксидный ЭКД-14 (табл. 14-9). Первые три состава — лаки с растворителями, последние четыре — без растворителей. Все эти составы обладают удовлетворительной цементирующей способностью, влагостойкостью и маслостойкостью.

После пропитки и сушки на лобовые части обмоток наносятся покровные составы. Их назначение — повысить стойкость обмотки к механическим воздействиям, влаге, маслу и т.п. Для этих целей применяют составы как с растворителями, так и без растворителей. Из составов с растворителями наибольшее распространение получили эмали марок ГФ-92-ГС и ЭП91. В качестве покровных составов без растворителей применяются компаунды КП-34 или КП-50.

Выводные провода

В двигателях серии 4А в качестве выводных концов применяются в основном провода марок РКГМ, ПВФС и ПВКФ класса повышенной стойкости F (табл. 14-10). Изоляционный слой проводов марки РКГМ выполнен из кремнийорганической резины, поверх которой накладывается оплетка из стекловолокон. Недостатком этих проводов является повреждаемость стеклянной оплетки в процессе пропитки и сушки обмотки. Кроме того, стеклянная оплетка затрудняет изоляцию с провода. Последнее обстоятельство делает невозможным применение механизированного способа зачистки концов.

Провода марок ПВФС и ПВКФ лишены этих недостатков. Изоляция этих проводов выполнена из фторсилоксановой резины марки ФС-55-2, поверх которой у проводов марки ПВКФ наносится защитная оболочка из кремнийорганической резины. Такая оболочка, кроме высокой нагревостойкости, механической прочности и стойкости к воздействиям температуры, лаков и растворителей при пропитке и сушке обмоток, обеспечивает также легкий сьем изоляции при зачистке концов, что позволяет механизировать этот процесс при массовом выпуске двигателей.

Номинальное сечение, мм ²	Наружный диаметр, мм, провода марки		
	ПВКФ (ТУ 16.505.354-77)	ПВФС (ТУ 16.505.354-77)	РКГМ (ГОСТ 16036-70)
0,75	3,6	3,6	3,6
1,0	3,7	3,7	3,7
1,5	4,0	4,0	4,0
2,5	4,7	4,7	4,7
4,0	5,3	5,3	5,3
6,0	6,8	6,4	6,8
10,0	7,7	7,7	7,7
16,0	9,3	8,9	9,3
25,0	10,8	10,6	10,6
35,0	12,1	11,9	12,3
50,0	13,8	13,8	13,8
70,0	16,6	16,4	16,6
95,0	18,7	18,3	18,3
120,0	20,8	20,0	21,6

Примечание. Предельные отклонения от номинального наружного диаметра не должны превышать +10%. Минусовый допуск не нормируется.

электроизоляционные трубки, материалы для заклиновки и зажима трубки

Для изолирования межкатушечных соединений и мест соединения обмотки с выводными проводами применяются гибкие электроизоляционные трубки. Наибольшее распространение получили трубки на основе кремнийорганических резин в связи с их высокой нагревостойкостью (класс Н). Отечественной промышленностью такие трубки выпускаются как неармированными (марки ТКР), так и армированными (марок ТКСГ, ТКСП). Наряду с высокими электроизоляционными свойствами трубки ТКР обладают и существенными недостатками — малой упругостью и стойкостью к прокалыванию, высоким коэффициентом трения и низким сопротивлением разрыву. Трубка марки ТКСП (табл. 14-11) на основе кремнийорганической резины армирована стеклошнурчулком и лишена недостатков трубки ТКР.

Таблица 14-11

Номинальный диаметр, мм	Максимальный наружный диаметр	Пробивное напряжение в исходном состоянии, кВ	Номинальный внутренний диаметр	Максимальный наружный диаметр	Пробивное напряжение в исходном состоянии, кВ
	мм		мм	мм	
3,0	3,0	5,0	5,0	7,3	5,0
4,0	4,0	5,0	6,0	8,3	6,0
5,2	5,2	5,0	7,0	9,3	6,0
6,2	6,2	5,0	8,0	10,5	6,0

В качестве материала для заклиновки всыпной обмотки в основном используются материалы пазовой изоляции увеличенной толщины — пленки марки ПЭТФ толщиной 0,2—0,3 мм, композитные материалы на основе пленки марки ПЭТФ. При этом заклиновка производится на станках-автоматах. При ручной укладке обмотки используются клинья из стеклотекстолита. Так как при изготовлении клиньев из этого материала отходы достигают 30%, то в последнее время находят применение клинья из профилированного стеклопластика, получающиеся путем непрерывного формования профиля клина из стеклоглута, пропитанного эпоксидно-фенольными и эпоксидными связующими.

Лобовые части всыпных обмоток двигателей серии 4Л переплеткой для придания им надлежащей формы подвергаются бандажировке крученой полиэфирной нитью или стеклошнурчужкой. Полиэфирная нить применяется при механизированной бандажировке, стеклошнурчужка может быть использована только при ручном способе бандажировки обмоток.

в) Материалы для магнитных клиньев

Значение магнитного клина как эффективного средства для улучшения массовых и энергетических показателей двигателей открытыми пазами было понято давно. Первый патент на магнитный клин был выдан в Германии в 1908 г. В настоящее время известно более 250 патентов и авторских свидетельств [182].

Известные конструкции магнитных клиньев могут быть разделены на следующие виды:

1) стальные клинья, набранные из пластин, располагаемых в логично шихтовке активной стали машины [183]. Относительная магнитная проницаемость этих клиньев $\mu_r = 10^2 \div 10^3$;

2) клинья на основе электроизоляционных материалов, содержащие направленные ферромагнитные составляющие: стальная проволока, сетка, гофрированные или прямые стальные пластины, таллированная бумага и т. д. [184]. Для этих клиньев $\mu_r = 10^2 \div 10^3$;

3) клинья, прессованные из железного порошка с какой-либо связующей основой: синтетические смолы, резина и т. д. [185]. Для этих клиньев $\mu_r \leq 10$.

Практическое, хотя и ограниченное применение в крупных электрических машинах нашли клинья третьего вида (масса ФМДМ, фирмы «Сименс» (ФРГ), масса ФМДМ, применяемая Харьковским электромеханическим и Лысьвенским турбогенераторным заводами [61, 186].

Из-за отсутствия достаточно надежных и технологичных магнитных клиньев применение их ограничено.

Магнитный клин, расположенный в зубцовой зоне асинхронного двигателя, работает в очень тяжелых условиях, подвергаясь переменным нагрузкам с широким спектром частот. Силы, действующие на клин, вызваны взаимодействием магнитных полей зубцовых зон с токами, протекающими по телу клина, магнитным тяжением между ферромагнитным наполнителем клина и магнитными полями зубцовой зоны, воздействием со стороны зубцов сердечника, находящихся под действием магнитных полей в воздушном зазоре.

Физико-механические параметры надежного и эффективного магнитного клина для асинхронных двигателей мощностью до 400 кВт должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) предел прочности при растяжении $\sigma \geq 6,4 \cdot 10^7$ Па;
- 2) предел прочности при статическом изгибе $\sigma_b \geq 10^8$ Па;
- 3) ударная вязкость $a_n \geq 10^4$ Дж/м²;
- 4) удельное объемное сопротивление $\rho_v \geq 10^4$ Ом·м;
- 5) относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 3$ в поле с $H = 3 \cdot 10^5$ А/м;
- 6) материал должен сохранять свои физико-механические свойства в течение 20 000 ч при температуре 155°C (для класса изоляции F).

Заданное значение ρ_v сводит к исчезающе малому значению как вихревые токи, индуцируемые в теле клина, так и поперечные,

Таблица 14-12

Наименование материала клина	Предел прочности при растяжении σ_r , МПа	Предел прочности при статическом изгибе σ_b , МПа	Ударная вязкость a_n , 10 ⁴ Дж/м ²	Теплостойкость по Вика, °С	Удельное объемное сопротивление ρ_v , 10 ⁴ Ом·м	Относительная магнитная проницаемость μ_r в поле $H = 3 \cdot 10^5$ А/м
Стеклотекстолит СТ-1	64	100	1,0	290	1	1,0
Масса ФМДМ	49	100	1,0	160	1000	4,0
Масса ЭПМ	34	70	0,6	170	1	3,2
Масса МДФ	71	170	1,2	300	100	3,2

текущие по клину и замыкающиеся через листы магнитопровода. Таким образом, силы, возникающие за счет взаимодействия магнитных полей зубцовой зоны с токами в клине, в этом случае практически не имеют места. При магнитной проницаемости клина $\mu = 3 \div 6$ силы магнитного тяжения, действующие на клин [187], невелики $[2,5 \div 5,0) \cdot 10^3$ Н/м], и механические параметры материала, указанные выше, должны обеспечить надежную работу клина.

В табл. 14-12 приведены физико-механические параметры магнитодизэлектриков, применяемых для изготовления магнитных клиньев, там же для сравнения даны параметры стеклотекстолита. Из таблицы видно, что наиболее полно удовлетворяет поставленным требованиям пресс-материал типа МДФ, полученный путем сухого смешивания 100 массовых частей фенолона С2 с 230 массовыми частями железного порошка ПЖ2М2.

14-2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К конструкционным относятся материалы, из которых изготавливаются детали, воспринимающие только механические нагрузки и соединяющие все элементы двигателя в одно электромеханическое устройство. Кроме того, конструкционные материалы служат для изготовления деталей системы охлаждения и защиты двигателя от воздействия внешней среды. Конструкционные материалы должны

обладать свойствами, определяемыми функциональным назначением деталей, для изготовления которых предназначен материал. Это прежде всего механическая прочность и малая плотность. Все это должно сочетаться с малой стоимостью и недефицитностью материала. Особое внимание уделяется технологичности материала.

К конструкционным материалам, применяемым в асинхронных двигателях общего назначения, относятся чугун, стальной прокат, алюминиевые сплавы и пластмассы.

а) Чугун

Чугун является одним из наиболее распространенных материалов, применяемых для изготовления литых деталей двигателя и прежде всего элементов оболочки (станины, подшипниковых щитов, подшипниковых крышек). Объясняется это благоприятным сочетанием физико-механических и технологических свойств чугуна в совокупности с его относительной дешевизной и недефицитностью. В электродвигателях применяются серые чугуны марок СЧ12-20, СЧ15-32 и СЧ18-36. Наибольшее распространение получили первые две марки. Последняя, так же как и СЧ21-40, применяется очень редко, в основном для изготовления деталей двигателей специального назначения, а также шкивов для плоско- и клиноременных передач.

б) Стальной прокат

Стальной прокат в асинхронных двигателях массовых серий мощностью до 100 кВт в качестве конструкционного материала имеет довольно ограниченное применение. Исключение составляет только круглый прокат, идущий на изготовление валов двигателей, и тонколистовой прокат, из которого выполняют кожух вентилятора наружного обдува. В двигателях мощностью свыше 100 кВт (с лисотами оси вращения 280—355 мм) и степенью защиты IP23, имеющих сварную конструкцию, стальной прокат применяется более широко. Он применяется для большинства деталей оболочки.

Так, вал двигателя изготавливается из стали марки 45, причем для двигателей с высотой оси вращения 90—250 мм прокат используется в состоянии поставки в двигателях с высотами оси вращения 280 мм и выше — в нормализованном.

Для изготовления направляющих щитков (диффузоров), кожуха вентилятора внешнего обдува и других деталей, получаемых методом глубокой вытяжки, используется тонколистовая сталь марок ШГО8КП и ШВГО8КП. Ряд неотъемлемых деталей (нажимные шайбы сердечника статора, крайние листы сердечников статора ротора, скобы и др.) изготавливается из тонко- и толстолистового стального проката обыкновенного качества (марки стали Ст.2, Ст.3).

в) Алюминий и его сплавы

Алюминий и его сплавы в асинхронных двигателях массовых серий имеют широкое применение. Номенклатура деталей и диапазоны их размеров продолжают интенсивно увеличиваться.

В настоящем разделе рассматривается применение алюминия и как проводникового материала, и как конструкционного. В качестве проводникового материала алюминий используется в основном как материал для короткозамкнутой обмотки ротора, получаемой различными способами заливки (статической, центробежной, под высоким и низким давлением). При этом используются как чистый технический алюминий, так и его сплавы, специально предназначенные для заливки роторов и отличающиеся от технического алюминия прежде всего величиной электропроводности. Наряду с элект-

Таблица 14-13

Марка сплава	Удельная электрическая проводимость при 20° С, 10 ⁶ См/м			Физико-механические свойства					
	в литом состоянии	после старения	предельные (в литом состоянии) значения, зависящие от химического состава	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Плотность при 20° С, кг/м ³	Средний температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Свободная линейная усадка, %	Твердость по Бринеллю НВ
Алюминий А7	32,0	32,0	29,5—34,0	90—120	20—30	2700	23,4	1,8	20—25
АКМцТ15-1,5	10,0	10,6	9,4—10,6	130	1	2600	19,3	1,0	55—70
АКМцТ10-1,5	12,0	13,3	11,0—13,0	130	1	2650	20,5	1,1	55—70
АМцТ2	12,0	12,0	11,0—13,0	120	4	2750	23,0	1,65	30—45
АКМцТ8-1	15,0	16,2	13,5—15,5	150	2	2700	21,0	1,15	50—65

ропроводностью к этим сплавам предъявляются требования, обеспечивающие качественную заливку роторов, — жидкотекучесть, малая газопоглощаемость, достаточный коэффициент линейного расширения и относительного удлинения и ряд других.

В табл. 14-13 приводятся основные характеристики алюминиевых сплавов, используемых для заливки роторов короткозамкнутых асинхронных двигателей. Наиболее широко применяется для заливки роторов технически чистый алюминий марки А7, ГОСТ 11069-74. Суммарное содержание железа, кремния, меди и прочих примесей должно в нем превышать 0,3%. Алюминий обладает всеми необходимыми физико-механическими и технологическими качествами, предъявляемыми к материалу для заливки роторов. Пригоден для заливки любым способом.

Сплав АКцТ15-1,5 обладает наименьшей удельной электропроводностью из всех применяемых для заливки роторов сплавов. Он имеет повышенное содержание кремния (14,5—16%) и требует специальных технологических мер для повышения пластичности. Сплав может применяться в двигателях с повышенным сопротивлением обмотки ротора.

Сплав АМцТ2 отличается высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Обладает более плотной структурой по сравнению с другими сплавами вследствие меньшей склонности к газонасыщению. Электрическая проводимость сплава стабильна при длительной эксплуатации в условиях высоких температур. Он может быть

рекомендован для заливки роторов, имеющих большое сечение короткозамкнутых колец.

Сплавы АКМцТ10-1,5 и АКМцТ8-1 в большей степени, чем сплав АМцТ2, обладают склонностью к газонасыщению, т.е. к образованию пористой структуры, в связи с чем они рекомендуются для заливки роторов с небольшим сечением короткозамыкающих колец.

Тенденции к снижению массы двигателей, повышению производительности труда за счет автоматизации и механизации производства, к коренному улучшению условий труда привели к необходимости все более широкого применения сплавов на основе алюминия в качестве конструкционного материала и прежде всего в качестве материала для оболочек двигателей. Эти сплавы обладают почти всеми необходимыми для этого качествами: имеют малую плотность, хорошие литейные свойства, удовлетворительную механическую прочность, коррозионную стойкость, обрабатываемость резанием, обладают хорошей теплопроводностью и, что особенно важно, недефицитны.

Алюминий в чистом виде имеет низкие механические характеристики и поэтому для изготовления конструктивных деталей двигателей не применяется. Для этой цели широко применяются сплавы алюминия с кремнием (АЛ12) и сплавы алюминия с кремнием и магнием (АЛ19). Они обладают хорошими литейными свойствами, просты в приготовлении и подвергаются механической обработке без особых затруднений (несколько хуже сплав АЛ12). Из этих сплавов изготавливаются все детали оболочки двигателей серии 4А с высотами оси вращения 56—63 мм и станины двигателей с высотами оси вращения до 100 мм.

По изложенным выше причинам возникла настоятельная необходимость в расширении области применения алюминиевых сплавов для изготовления станин и щитов двигателей больших высот оси вращения. Главным препятствием остается все же недостаточная механическая прочность алюминиевых сплавов АЛ12, АЛ19 (табл. 14-14).

Наиболее подходящими для изготовления оболочек являются цинковые и меднистые силумины, модифицированные небольшими присадками (до 0,2% массы) титана, сурьмы, кадмия и церия. Цинковый силумин (Al-Si-Zn-Mg) в литом состоянии имеет больший предел прочности при растяжении. Твердость его существенно выше, чем у сплавов АЛ12 и АЛ19 (табл. 14-14).

Таблица 14-14

Марка сплава	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, НВ
АЛ12*	160	1—2	50
АЛ19*	160—170	1—2	50
Цинковый силумин	260—370	—	80—100
Меднистый силумин	260—370	—	85—100

* Без модифицирования и термообработки.

Механические параметры меднистого силумина (Al-Si-Cu-Mg) такие же, как и у цинкового силумина. Технологические свойства этих высокопрочных алюминиевых сплавов позволяют отливать детали любой конфигурации, в том числе и ребристые станины с ребрами аксиальными ребрами, всеми современными методами литья.

1) Пластмассы

Пластмассы в качестве конструкционного материала находят большее применение. Обусловлено это целым рядом свойств, присущих пластмассам и деталям, изготовленным из них. К ним относится легкость переработки (литье, прессование). После этих операций детали не требуют механической обработки, дополнительной защиты от воздействия внешней среды, а также декоративных покрытий. Они отличаются малой плотностью. Кроме того, к ним из пластмасс присущи электроизоляционные свойства.

Наиболее широкое применение находят литейные пластмассы, которые позволяют получать детали сложной конфигурации, например вентиляторы, наиболее простым способом — литейным. Для нагруженных деталей, работающих при температуре не выше 60°C, чаще всего применяется капроновая смола марки Б. Для деталей, работающих в широком диапазоне температур (от -40 до +120—130°C), нашел применение морозостойкий полипропилен различных марок.

Из пластмасс, перерабатываемых методом прессования, наиболее распространенные получили пластмассы с высокой электрической прочностью, большим поверхностным сопротивлением, большой водостойкостью и большой механической прочностью. Из этого ряда особо следует выделить пластмассу АГ-4, которая в зависимости от наполнителя имеет две разновидности: АГ-4В (наполнитель — путаная стеклянная нить) и АГ-4 (наполнитель — стеклянная нить). Эти пластмассы обладают самыми высокими механическими свойствами. Единственным недостатком их является относительно трудная переработка — высокие давление и температура при прессовании.

Широкие перспективы открываются с появлением новых пластмасс. В первую очередь к ним следует отнести литейной лавсан, поликарбонат дифлон и полиарилаты.

Литейной лавсан марки 030110 — новый полимерный материал с высокими физико-механическими, диэлектрическими и антифрикционными свойствами. Он может применяться для изготовления деталей конструкционного и электротехнического назначения. Поликарбонат дифлон, обладая комплексом физико-механических и электрических свойств, в перспективе может широко использоваться в электротехнических изделиях и в качестве диэлектрика, и как конструкционный материал. Он хорошо перерабатывается литьем под давлением, экструзией и другими методами. Детали из дифлона хорошо поддаются механической обработке, сварке и склеиванию. Полиарилаты (марок А-3, Д-4, Ф-1 и Ф-2) также обладают всеми необходимыми свойствами для использования в качестве конструкционной пластмассы.

В табл. 14-15 приведены параметры пластмасс, применяемых в синхронных двигателях для изготовления деталей конструкции.

Таблица 14-15

Параметр	Марки пластмасс							
	АГ-4В, ГОСТ 20437-75	АГ-4С, ГОСТ 20437-75	Поликар- бонат дифлон	Литьевой лавсан 030110	Фенопласт ВХ1-090-54	Полиарилаты		
	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-7	Д-8	Д-9	Д-10
Плотность, кг/м ³	1700— 1900	1700— 1900	1200	1290— 1330	1600	1150	1150	1110
Предел прочности, МПа:								
при растяжении	80	500	65—75	50—60	—	85—90	45—50	30—40
при сжатии	130	250	90—95	90—110	150	90—120	80—100	60—70
при статическом из- гибе	120	—	80—110	80—90	55	100—120	50—60	45—55
Ударная вязкость, ×10 ³ Дж/м ²	30	150	90—1500	15—30	4,2	50—80	20—25	18—20
Относительное удлине- ние при разрыве, %	—	—	50—110	—	—	—	—	—
Твердость НВ	—	—	15—16	10—11	30—40	20—25	19—20	18—20
Теплостойкость, °С:								
по Мартенсу	280	280	130—140	—	125	—	—	—
по Вика	—	—	150—160	—	—	—	210	268
при изгибе и нагруз- ке 1,76·10 ⁸ Па	—	—	—	83	—	—	—	—
Электрическая проч- ность, МВ/м	13	13	18—250	12—17	13	—	—	—
Удельное объемное элек- трическое сопротивле- ние, Ом·м	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹³ —10 ¹⁴	10 ¹⁴ —10 ¹⁵	10 ¹⁰	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁵
Относительная диэлек- трическая проницае- мость при частоте 10 ⁶ Гц	8,0	8,0	2,5—3,0	3,3—3,5	6,0	2—2,5	2—2,5	2,5—3,0
								2,5—3,5

ного и электротехнического назначения: вентиляторов, кожухов, диффузоров, элементов вводного устройства.

б) Вспомогательные материалы

Вспомогательным материалом конструкционного назначения является стеклянная бандажная лента, предназначенная для бандажирования лобовых частей обмотки ротора и других вращающихся скользящих частей. Она состоит из параллельно расположенных стеклянных нитей, скрепленных между собой электроизоляционным лаком класса нагревостойкости В или F, что и определяет допустимую рабочую температуру бандажа.

Основные преимущества стеклянной бандажной ленты перед бандажной проволокой, применявшейся для этой же цели, — это меньшая плотность материала, что снижает собственную центробежную силу бандажа. Лента обладает электроизоляционными свойствами, в результате чего отпадает необходимость в изоляции бандажа от обмотки; в бандаже не возникает греющих потерь, и не требуется дополнительных мер по закреплению витков между собой. Входящий в состав бандажной ленты лак в процессе сушки ротора полимеризуется, надежно скрепляя витки бандажа в практически монолитную массу.

Предел прочности при растяжении ленты класса нагревостойкости F (ЛСБ-F, ТУ-6-11-22-70) не менее $7,0 \cdot 10^8$ Па.

14-3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ, ЩЕТКИ И ПРИПОИ

Материалы для контактных колец

Наиболее распространенными материалами для изготовления контактных колец асинхронных двигателей с фазным ротором являются медь и сплавы на ее основе, не содержащие цинка. Объясняется это рядом положительных свойств, присущих меди и ее сплавам, и прежде всего ее высокой теплопроводностью и значительной коррозионной стойкостью, что имеет особенно важное значение для контактных поверхностей, однако чистая медь обладает недостаточной твердостью. Это приводит к нарушению чистоты рабочей поверхности колец и как результат к неудовлетворительной работе переходного скользящего контакта кольцо — щетка. При этом поверхности колец быстро изнашиваются как за счет истирания щетками, так и за счет необходимости частой шлифовки поверхностей. С этой точки зрения бронзы различных марок значительно превосходят чистую медь. Особенно хорошими свойствами обладают бронзы, содержащие в своем составе бериллий (Be), — повышенная твердость, коррозионная стойкость. Однако контактные кольца из чистой меди и на основе медных сплавов обладают одним общим недостатком — материалы дефицитны и дорогостоящи. Поэтому в ряде случаев и прежде всего в крупных асинхронных двигателях контактные кольца изготавливают из конструкционной стали обыкновенного качества (Ст.5).

Большой интерес представляют контактные кольца из чугуна (СЧ15-32). Экспериментально установлено, что при давлении на щетку около $0,2 \cdot 10^5$ Па переходное сопротивление контакта на чу-

Таблица 14-16

Наименование и марка припоя	ГОСТ	Основные компоненты	Темпера- тура плавления, °С		Плотность, кг/м³	Температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Удельное электрическое сопротивление, 10 ⁻⁶ Ом·м	Предел прочности при растяжении, МПа	Применение	Рекомендуемый флюс
			начало	конец						

Мягкие припои

Олово 02	ГОСТ 860-75	Олово 99,6%, остальное при- меси	232	232	7300	20	—	18,6	Горячее лужение наконечников, пайка соединений и роторов (двигатели с фазным ротором)	Канифоль сосновая или канифольно-спиртовая смесь
Оловянно-свинцовый ПОССу 62-05	ГОСТ 21930-76	Олово 59—61%, сурьма 0,05—0,5%, остальное свинец	183	189	8500	21	0,14	44,1	То же	То же

Оловянно-свинцовый ПОССу 40-0,5

ГОСТ 21930-76

Олово 49—41%, сурьма 0,05—0,5%,
остальное свинец

183 235 9300 25 0,16 39,2

Оловянно-свинцовый ПОССу 30-0,5

ГОСТ 21930-76

Олово 29—31%, сурьма 0,05—0,5%,
остальное свинец

183 255 8700 26,5 0,179 35,3

Горячее лужение и пайка малоответственных деталей

» »

Твердые припои

Медно-фосфористый МФ2	ГОСТ 4515-75	Фосфор 7,9—9,5%, остальное медь	710	800	8500	—	—	324	Сварка соединений обмоток статоров с круглым и прямоугольным проводом; пайка обмотки с выводами проводами	Бура (плавленная)
-----------------------	--------------	------------------------------------	-----	-----	------	---	---	-----	---	-------------------

гунных кольцах несколько больше, чем на медных, но значительно меньше, чем на стальных; потери на трение щеток на медных кольцах наибольшие, на стальных и чугунных они почти одинаковы. Таким образом, суммарные потери на чугунных кольцах больше, чем на медных, но меньше, чем на стальных.

С точки зрения коррозионной стойкости колец перспективным является применение перлитного чугуна. Хорошая работа колец из этого чугуна обуславливается большим содержанием углерода (до 3%), который в виде пластинчатых кристаллов равномерно распределен по всей структуре чугуна. Пластинчатый графит создает на поверхности слой смазки, значительно снижающий потери на трение щеток.

Щетки

Наибольшее распространение в асинхронных двигателях с фазным ротором получили медно-графитные и электрографитированные щетки. Щетки разных марок различаются по твердости, электропро-

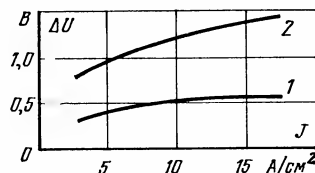


Рис. 14-1. Зависимость $\Delta U = f(j)$.

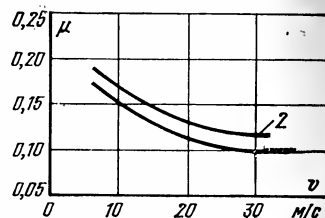


Рис. 14-2. Зависимость $\mu = f(v)$.

водности, коэффициенту трения и плотности. Они допускают разную плотность тока и удовлетворительно работают при определенных значениях удельного нажатия. На рис. 14-1 и 14-2 приведены зависимости падения напряжения в щетке ΔU от плотности тока J и коэффициента трения μ от окружной скорости v для медно-графитных (кривая 1) и электрографитированных (кривая 2) щеток.

Припой

В асинхронных двигателях припой применяются для пайки разъемных соединений токоведущих частей и для лужения контактных поверхностей токоведущих деталей, предназначенных для механического соединения между собой.

В зависимости от температуры плавления припой можно разделить на две группы: легкие и твердые. К легким относятся припой на основе олова с добавлением свинца, серебра, сурьмы и других металлов, а также чистое олово. Температура плавления легких припоев не выше 300°C. Наибольшее распространение из этой группы получили оловянно-свинцовые припой с содержанием от 30 до 60% олова. К твердым относятся припой на основе серебра (от 85 до 15%) и меди. Температура плавления их находится в диапазоне

от 600 до 1200°C. Из этой группы припоев наибольшее распространение получили припой на основе меди.

При выборе марки (типа) припоя необходимо учитывать характер и назначение соединения, где предполагается применить припой. При этом нужно иметь в виду, что линейные коэффициенты температурного расширения припоя и материала должны быть максимально близкими, особенно если двигатель предназначен для работы в условиях резкого колебания температур.

В табл. 14-16 приведены некоторые наиболее часто применяемые в двигателях общего назначения припои, их основные физико-технологические особенности и области применения. Здесь же указаны и рекомендуемые флюсы.

14-4. МАТЕРИАЛЫ ПОКРЫТИЙ, КОНСЕРВАЦИИ, УПЛОТНЕНИЙ

Для защиты от воздействия окружающей среды двигателя в целом и его отдельных частей, а также для придания эстетически законченного вида машине используются защитно-декоративные покрытия. Покровные материалы испытывают два вида воздействия. Первый вид — это факторы внешней среды: влага, резкая смена температур, агрессивные газы и аэрозоли, содержащиеся в окружающем воздухе, облучение. К этой же категории воздействий следует отнести облив водой, в том числе заборной морской, и щелочными (дезинфицирующими) растворами. Второй вид воздействия — это тепловое излучение поверхностей работающего двигателя.

Покрытия могут быть разделены на металлические, органические (лакокрасочные) и неорганические (покрытия оксидными пленками). Металлические покрытия обладают по сравнению с лакокрасочными большей механической прочностью и надежностью. Однако технология нанесения их сложна, имеет значительно большую трудоемкость, в связи с чем металлические покрытия предусматриваются только для деталей, поверхности которых в процессе изготовления двигателя и его эксплуатации подвергаются многократным механическим воздействиям, а также для токопроводящих деталей (крепеж, детали вводного устройства, соединительные хомутки и т. д.).

Оксидные покрытия применяются в основном для деталей, работающих в масляной среде, так как хорошо удерживают на своей поверхности различного рода смазки, в том числе и консистентную подшипниковую. Этому виду покрытия подвергаются пружины осевого нажатия подшипников.

Наиболее распространены лакокрасочные покрытия. С их помощью защищают от коррозии свыше 95% металлических поверхностей двигателя. Вид лакокрасочного материала, система покрытия выбираются в зависимости от категории размещения и условий эксплуатации двигателя. Условно покрытия могут быть разделены на две категории: стойкие в нормальных климатических условиях и стойкие в особых условиях (средах).

От воздействия климатических факторов внешней среды умеренного климата надежно защищает система покрытий, состоящая из одного слоя грунта (ГФ02, ФЛ-03К, ФЛ-993) и двух слоев эмали (ПФ-115, МЛ-1156, МС-17).

Эмали ПФ-115 и МЛ 1156 стойки к периодическому воздействию минерального масла, бензина, воды и температуры не выше 150°C. Эмаль МЛ1156 атмосферостойка. Особенностью ее является возможность нанесения второго слоя без предварительной сушки первого. Обе эти эмали сушатся горячим способом.

Эмаль МС-17 обладает теми же свойствами, что и эмали ПФ-115 и МЛ 1156, однако имеет более хрупкую пленку и допускает воздействие температуры не выше 70°C. Сушится на воздухе.

Для защиты от коррозии в условиях тропического климата используются лакокрасочные материалы, обладающие малыми водопоглощаемостью и набухаемостью. Широко применяются системы, состоящие из одного слоя грунта (ФЛ-03К, АК-70, ФЛ-993) и двух слоев эмали.

Алкидомеламиновые эмали МЛ-12, МЛ-152, МЛ-165 обладают высокой атмосферостойкостью в условиях тропического климата, придают изделию хороший товарный вид. Покрытия светостойки, эластичны, с хорошей адгезией, масло-, бензо- и водостойки (при периодическом воздействии). Длительно работают при температуре до 120°C и кратковременно — до 150°C. Эмали МЛ12 и МЛ-152 требуют более тщательной подготовки поверхности перед нанесением покрытия — высота микронеровностей не должна превышать 160 мкм. Для этой же цели используется эмаль на основе эпоксидной смолы — ЭП-140.

В особо жестких условиях эксплуатируются покрытия двигателей для морского флота и рыбообрабатывающих цехов. Кроме воздействия климатических факторов (температуры, влаги), поверхности подвергаются воздействию морской воды и периодический 20%-ного раствора поваренной соли. Надежно защищают в этих условиях лишь покрытия толщиной не менее 10 мкм. При этом высота микронеровностей поверхности до покрытия не должна превышать 120 мкм. Для покрытия применяются системы, состоящие из двух слоев грунта (ВЛ02+АК07, ЭП00-10) и трех слоев эмали (ЭП-140, ЭП-773, ЭП-525).

Эмали на основе эпоксидных смол стойки к большинству агрессивных сред, длительно выдерживают температуру до 200°C.

Особые требования предъявляются к покрытиям внутренней поверхности сердечника статора и поверхности сердечника ротора. Кроме общих требований, которые предъявляются к покровным эмалям, эмали для покрытия этих частей двигателя должны обладать повышенной нагревостойкостью (температура активных частей двигателя существенно выше, чем температура наружной поверхности), обладать электроизоляционными свойствами, надежно выполнять свои функции при нанесении тонким слоем (10—15 мкм), надежно защищать от воздействия влаги. Этим требованиям в полной мере отвечают эмали ГФ-92-7С и КО-935. Однако они недостаточно технологичны, так как требуют длительной сушки при температуре 120—180°C. В меньшей степени этим требованиям отвечает грунт УРФ-0110. Но благодаря своей технологичности он получает распространение для покрытия поверхности короткозамкнутых роторов, а также внутренних частей станин и щитов. Грунт сохнет на воздухе в течение 10—15 мин.

Поверхности двигателей из черных и цветных металлов, не защищенные постоянным покрытием (металлическим, лакокрасочным), подлежат консервации пластичными (консистентными) смазками. Консервации, как правило, подвергаются все сопрягаемые поверх-

ности и поверхности трения (выступающие концы валов, замковые поверхности, опорные поверхности лап и крепительного фланца, контактные кольца). В качестве консервационных материалов чаще всего применяются консистентная ингибированная консервационная смазка ПВК ГОСТ 19537-74 и смазка ГОИ54П ГОСТ 3276-74. Подшипниковая смазка также играет роль консервационной для деталей подшипникового узла. Однако главное ее назначение — уменьшение трения в подшипнике. В двигателях общего назначения применяются только консистентные смазки. Они имеют то преимущество, что могут удерживаться в подшипниковом узле наиболее простыми способами и сами в значительной степени служат уплотнением подшипникового узла, препятствуя проникновению в него влаги и пыли. При выборе типа смазки необходимо прежде всего учитывать диапазон температур, при которых должен эксплуатироваться двигатель.

В наибольшей степени всем предъявляемым требованиям удовлетворяет смазка ЦИАТИМ 203 ГОСТ 8773-73. Диапазон рабочих температур у нее от —50 до +90°C. Температура каплепадения не ниже 150°C. Смазка водостойка. Это дает возможность применять ее для всех двигателей общего назначения, работающих как при низких температурах (до —50°C), так и в условиях тропического климата.

В качестве материалов для уплотнения неподвижных и вращающихся частей двигателя применяются различного рода резиновые прокладки, войлочные и резиновые манжеты. Для уплотнения подшипниковых узлов в качестве контактных уплотнений применяются войлок технический тонкошерстный (ГОСТ 288-72) и манжеты резиновые, армированные (ГОСТ 8752-70).

Глава пятнадцатая

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ 4А

5-1. ШКАЛА МОЩНОСТЕЙ,

ШКАЛА УСТАНОВОЧНЫХ РАЗМЕРОВ

И ИХ ВЗАИМНАЯ УВЯЗКА;

НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ; СТРУКТУРА СЕРИИ

Серия асинхронных двигателей 4А на напряжение до 1000 В (основное исполнение) охватывает диапазон мощностей от 0,06 до 100 кВт (при 1500 об/мин) и предназначена для продолжительного режима работы S1 (ГОСТ 183-74) от сети переменного тока частотой 50 Гц. Шкала мощностей составлена по основному ряду публикации МЭК 72 (1971 г.) и соответствует ГОСТ 12139-74.

Двигатели изготавливаются на следующие номинальные напряжения: 220, 380 В — двигатели мощностью от 0,06 до 0,37 кВт; 220, 380, 660 В — двигатели мощностью от 0,55 до 11 кВт; 220/380 и 380/660 В — двигатели мощностью от 15 до 110 кВт; 380/660 В — двигатели мощностью от 135 до 400 кВт.

Серия размещена в 17 высотах оси вращения от 50 до 355 мм. Ряд высот оси вращения составлен на основе рекомендаций МЭК (публикация 72) и соответствует ГОСТ 13267-73. Установочные

Таблица 15-1а

h, мм	Условное обозначение длины станины и сердечника	Мощность, кВт, при числе полюсов					
		Степень защиты IP44					
		2p=2	2p=4	2p=6	2p=8	2p=10	2p=12
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—
90	LA	—	—	—	0,75	—	—
	LB	3,0	2,2	1,5	1,1	—	—
100	S	4,0	3,0	—	—	—	—
	L	5,5	4	2,2	1,5	—	—
112	MA	—	—	3,0	2,2	—	—
	MB	7,5	5,5	4,0	3,0	—	—
132	S	—	7,5	5,5	4,0	—	—
	M	11	11	7,5	5,5	—	—
160	S	15	15	11	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	—
180	S	22	22	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—
200	M	37	37	22	18,5	—	—
	L	45	45	30	22	—	—
225	M	55	55	37	30	—	—
	S	75	75	45	37	22	—
250	M	90	90	55	45	30	—
	S	110	110	75	55	37	—
280	M	132	132	90	75	45	—
	S	160	160	110	90	55	45
315	M	200	200	132	110	75	55
	S	250	250	160	132	90	75
355	M	315	315	200	160	110	90

Таблица 15-1б

h, мм	Условное обозначение длины станины и сердечника	Мощность, кВт, при числе полюсов					
		Степень защиты IP23					
		2p=2	2p=4	2p=6	2p=8	2p=10	2p=12
160	S	22	18,5	—	—	—	—
	M	30	22	—	—	—	—
180	S	37	30	18,5	15	—	—
	M	45	37	22	18,5	—	—
200	M	55	45	30	22	—	—
	L	75	55	37	30	—	—
225	M	90	75	45	37	—	—
250	S	110	90	55	45	—	—
	M	132	110	75	55	—	—
280	S	160	132	90	75	45	—
	M	200	160	110	90	55	—
315	S	—	200	132	110	75	55
	M	250	250	160	132	90	75
355	S	315	315	200	160	110	90
	M	400	400	250	200	132	110

размеры двигателей серии 4А в зависимости от высоты оси вращения соответствуют рекомендациям МЭК (публикация 72) и регламентируются ГОСТ 18709-73. По точности выполнения установочных размеров двигателя серии 4А в соответствии с ГОСТ 8592-71 подразделяются на три категории: нормальной, повышенной и высокой точности.

Увязка мощностей с установочными размерами для двигателей основного исполнения со степенью защиты IP44 и IP23 соответствует РС 3031-71 и установлена ГОСТ 19523-74 (табл. 15-1а, б).

Из табл. 15-1а, б видно, что двигатели с высотами оси вращения $h=50, 56, 63, 71, 80, 90, 112$ и 225 мм имеют одну длину станины и при наличии двух ступеней мощности отличаются длиной сердечника (А или В). В остальных высотах оси вращения предусмотрено по две длины станины.

В серии 4А предусмотрены три исполнения по степени защиты: IP44 для двигателей с высотами оси вращения 50—355 мм; IP23 для двигателей с высотами оси вращения 160—355 мм; IP54 для двигателей специализированных исполнений с высотами оси вращения 50—250 мм.

Двигатели с исполнением по степени защиты IP23 не предусмотрены в высотах оси вращения ниже 160 мм, в которых их мощность не превышает при одинаковых размерах активной части мощности двигателей исполнения по степени защиты IP44.

Форма исполнения двигателей серии 4А по способу монтажа приведена в табл. 15-2.

Таблица 15.2

h, мм	Степень защиты по ГОСТ 17494-72	Исполнение по способу монтажа по ГОСТ 2479-65
160—355	IP23	M101
50—250	IP44	M100, M200
280—355	IP44	M101, M201
50—90	IP44	M210
50—180	IP44	M300
200—280	IP44	M302, M303
50—100	IP44	M360
50—250	—	M534, M535

Структура серии 4А соответствует описанной в гл. 1.

Все модификации, специализированные и узкоспециализированные исполнения, за исключением двигателей с фазным ротором и лифтовых, разработаны на базе закрытых двигателей. Характеристики основных модификаций серии 4А приведены в § 15-4.

15-2. КОНСТРУКЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

а) Основные конструктивные решения

По конструктивной схеме двигателя серии 4А следует разделить на две основные разновидности, вытекающие из степени защиты и способа охлаждения: двигатели со степенью защиты IP44 (54) и наружным обдувом (рис. 15-1) и двигатели со степенью защиты IP23 (рис. 15-2). Как первые, так и вторые на разных отрезках серии имеют некоторые различия в конструктивных решениях, обусловленные различием размеров машин, а также различием технологии их производства. Однако для серии характерны прежде всего единство главных конструктивных решений и общие конструктивные признаки, определяющие общее подобие двигателей.

Общим в конструктивных схемах двигателей со степенью защиты IP44 (54) является:

станина с продольными радиальными ребрами, увеличивающими поверхность теплоотдачи;

наружный обдув двигателя центробежным реверсивным дисковым вентилятором (рис. 15-3) с использованием кожухов (рис. 15-4) для направления потока воздуха и обеспечения необходимой степени защиты вентилятора (IP20).

На отдельных участках серии двигатели имеют и некоторые конструктивные отличия.

В двигателях со степенью защиты IP44 температура обмотки статора максимальна в лобовых частях. На участке серии с высотами 50—180 мм вентиляционные лопасти ротора выполняют роль мешалки и осуществляют турбулизацию воздуха в зоне лобовых частей. Для двигателей с высотами оси вращения 200—250 мм (см. рис. 15-1) простое перемешивание воздуха оказывается недостаточным. В этих машинах для увеличения скорости обдува лобовых частей и подшипниковых щитов и улучшения таким образом отвода тепла к щитам движение всасываемого воздуха упорядочено направ-

ляющими щитками, укрепленными на оребренных с внутренней стороны подшипниковых щитах. При такой системе внутренней циркуляции воздух под действием лопаток ротора, работающих как центробежный вентилятор, поступает в полость лобовых частей обмотки статора. Затем, проходя через полость, образованную направ-

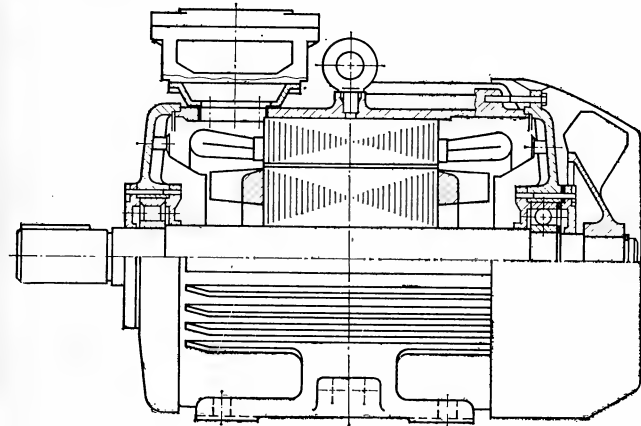


Рис. 15-1. Двигатель 4А250 (исполнение по степени защиты IP44).

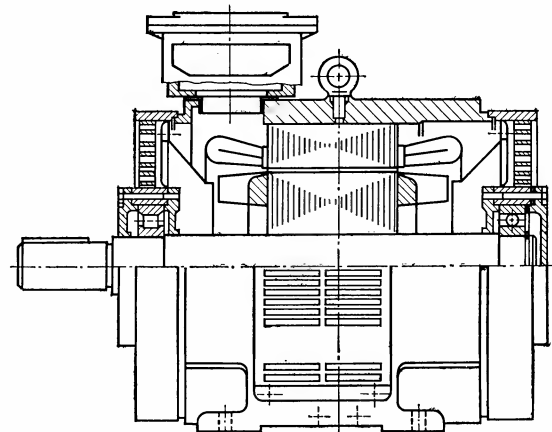


Рис. 15-2. Двигатель 4АН250 (исполнение по степени защиты IP23).

ляющим щитком и подшипниковым щитом, отдает последнему часть теплоты и, охлажденный, вновь направляется лопатками ротора в зону лобовых частей.

Конструктивная схема двигателей с высотами оси вращения 280—355 мм (рис. 15-5) несколько отличается от описанной выше.

Известно, что в двигателях закрытого обдуваемого исполнения наиболее нагретой частью является ротор, оказывающий существенное влияние на температуру обмотки статора. Так как теплопередача от ротора идет в основном через статор, то с увеличением радиальных размеров машины отвод теплоты от ротора становится все более затруднительным. С целью уменьшения влияния нагрева ротора на нагрев статора и интенсификация охлаждения подшипниковых узлов на этом участке серии принята система с форсированным



Рис. 15-3. Вентилятор на ружного обдува.

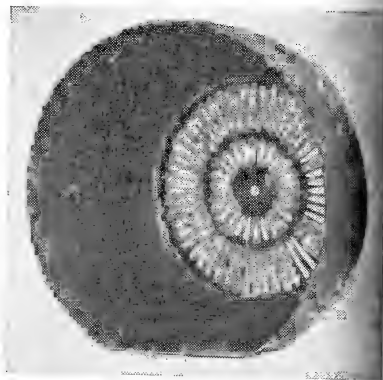


Рис. 15-4. Кожух вентилятора.

охлаждением ротора. Охлаждение наружной поверхности оболочки осуществляется, как и в любом двигателе, с наружным обдувом. Для форсированного охлаждения ротора потоком воздуха окружающей среды на диске вентилятора наружного обдува расположены дополнительные лопасти, с помощью которых охлаждающий воздух протягивается через торцевые окна в подшипниковом щите (со стороны выступающего конца вала), через аксиальные каналы ротора и торцевые окна в подшипниковом щите со стороны вентилятора. В камере, образованной подшипниковым щитом и кожухом, этот воздух смешивается с воздухом, засасываемым основными лопатками наружного обдува через решетку кожуха, и направляется вдоль станины. Для обеспечения степени защиты IP44 вентиляционный тракт ротора отделен от полости статора диффузорами с лабиринтными уплотнениями.

Двигатели защищенного исполнения со степенью защиты IP23 охватывают диапазон высот оси вращения от 160 до 355 мм. Общими конструктивными решениями, характерными для этих двигателей, являются двусторонняя симметричная радиальная система вентиляции, причем нагнетательными элементами служат лопасти, отлитые заодно с короткозамыкающими кольцами обмотки ротора, близкая к квадратной форма станины с отверстиями для выхода охлаждающего воздуха, щиты с отверстиями для входа охлаждающего воздуха.

В двигателях с высотами оси вращения 160—250 мм (см. рис. 15-2) воздух засасывается через торцевые окна в щитах, омывает лобовые части и спинку статора и выбрасывается через окна средней части станины. В двигателях с высотами оси вращения 80—355 мм (рис. 15-6) схема вентиляции аналогичная. Воздух через торцевые окна в щитах попадает в камеры, образованные сердечником статора и кожухом, и выбрасывается через отверстия в боковой поверхности кожуха.

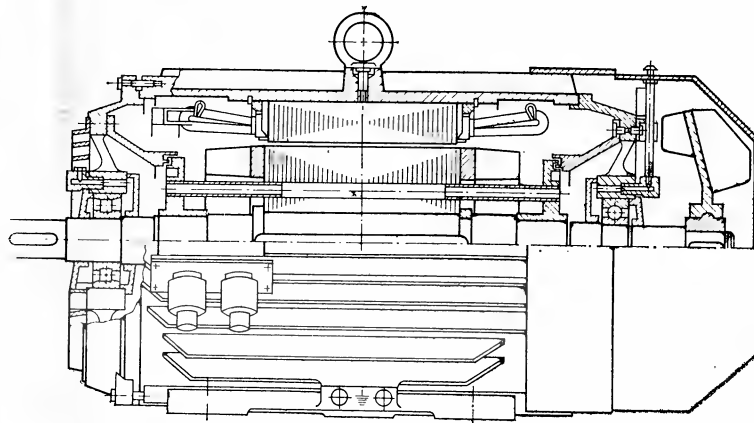


Рис. 15-5. Двигатель 4A280 с форсированным охлаждением ротора исполнение по степени защиты IP44).

При рассмотрении конструкции целесообразно разбиение серии стрезки по высотам оси вращения: 50—63; 71—100; 112—132; 140—180; 200—250 и 280—355 мм. Внутри каждого из этих отрезков в двигатели между собой полностью подобны и конструктивные решения всех их деталей и сборочных единиц идентичны.

Конструкция оболочек

Станины двигателей с высотами оси вращения 50—63 мм изготавливаются из алюминиевого сплава АЛ-2. Для обеспечения минимальной повреждаемости лобовых частей обмотки статора при тщательной обработке замков станины имеют наружные замковые поверхности. Лапы прилитые. В верхней части станины со стороны выступающего конца вала предусмотрены приливы для разъемов и крепления вводного устройства. Для двигателей с высотой оси вращения 71—100 мм станины могут выполняться как из алюминиевого сплава, так и из чугуна. В случае выполнения из алюминиевого сплава станины по конструкции соответствуют описанным выше.

Основные конструктивные решения станин из чугуна для двигателей всех высот серии следующие: 1) все они выполняются с приливами лапами; 2) внутренних карманов станины не имеют, что

позволяет вести бесстыржевую формовку (при литье в землю). Конструкция станины двигателей с высотами оси вращения 71—132 мм позволяет вести отливку в кокиль. На станинах расположены продольные приливы для крепления подшипниковых щитов. В двигателях с высотами оси вращения 160 и 180 мм сопряжение лап с корпусом усилено утолщениями и поперечными ребрами, а в двигателях с высотами оси вращения 200—250 мм — полыми ребрами.

Таблица 15-4

h , мм	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315
h_p , мм	14	14	16,5	20	21	24	27	30	30	34,5	40	45	50
t_p , мм	8,1	9,2	9,3	13,1	10	11	12,8	17,4	15,7	19,8	24,7	33	43
k_{op}	1,75	1,65	1,75	1,90	2,25	2,25	2,10	2,10	2,2	2,4	2,1	2,1	1,8

рами, обеспечивающими проход охлаждающего воздуха вдоль станины. Параметры оребрения корпусов — высота ребра h_p , шаг оребрения t_p и коэффициент оребрения (отношение полной поверхности станины с учетом оребрения к поверхности гладкого цилиндра с размерами, равными диаметру и длине станины) — приведены в табл. 15-3.

Конструкция станины двигателей со степенью защиты IP23 имеет две разновидности. У двигателей с высотами оси вращения 160—250 мм (см. рис. 15-2) станины выполнены литыми из чугуна, с внутренними ребрами, на которых крепится сердечник статора. Оболочка станины и внутренние ребра образуют продольные каналы для прохода охлаждающего воздуха. Как и в двигателях со степенью защиты IP44, замковые поверхности станины выполнены наружными.

Двигатели с высотами оси вращения 280—355 мм (рис. 15-4) имеют сварной корпус, выполненный в виде полустанины цилиндрической формы. Полустанина крепится на четырех стойках, соединенных в основании продольными планками с отверстиями под фундаментные болты, а в верхней части — двумя ребрами из толстолистовой стали. Стойки корпуса имеют кольцевые заточки. На заточках наружных стоек центрируются подшипниковые щиты, на внутренних — сердечник статора с обмоткой. Полустанина закрывается кожухом из листовой стали.

Двигатели с высотами оси вращения 50—250 мм по виду производства относятся к массовым и крупносерийным изделиям. Из этого вытекают специфические требования к конструкции деталей оболочек. В каждой высоте оси вращения предусмотрено не более двух станин, отличающихся только по длине, с лапами и соответственно двух станин без лап (исполнение М300). Конструкция станины предусматривает возможность автоматического закрепления

при механической обработке на автоматических линиях и агрегатных станках. Станины двигателей со степенью защиты IP44 и IP23 имеют одинаковые координаты обрабатываемых поверхностей, что обеспечивает возможность их обработки на одном оборудовании.

Подшипниковые щиты двигателей с высотами оси вращения 50—63 мм выполнены, как и станины, из алюминиевого сплава и имеют ребра на наружной поверхности, совпадающие при сборке машины с ребрами станины. Отверстие под подшипник армировано

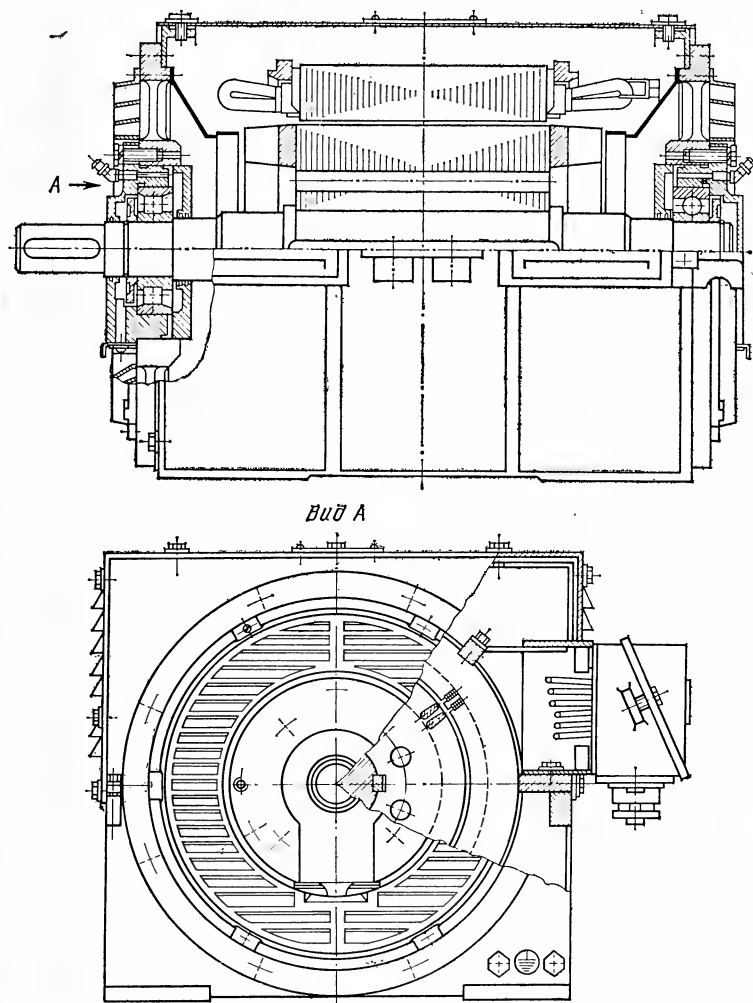


Рис. 15-6. Двигатель 4АН315 (исполнение по степени защиты IP23).

стальной втулкой, благодаря чему обеспечивается стабильность размеров отверстия и возможность многократной переборки двигателя без нарушения посадки подшипника.

Подшипниковые щиты двигателей с высотами оси вращения 71—250 мм и степенью защиты IP44 выполняются из чугуна, без наружного оребрения (рис. 15-7). Щиты двигателей с высотами оси вращения 200—250 мм имеют внутреннее оребрение. Щиты выполнены с внутренними замковыми поверхностями, что позволяет повысить точность размеров их посадочных поверхностей за счет одновременной обработки спаренным инструментом замковой поверхности и поверхности отверстия под подшипник. Подшипниковые щиты имеют небольшую глубину, что обеспечивает их жесткость при обработке и сборке.



Рис. 15-7. Подшипниковый щит двигателя 4А.

ковые щиты выполнены с окнами на торцевой поверхности для входа (выхода) охлаждающего воздуха. Замковые поверхности на щитах наружные (на станинах соответственно внутренние).

в) Конструкция активных частей

Сердечники статора и ротора собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм (см. гл. 2 и 14).

Сердечники статоров двигателей 4А с высотами оси вращения 50—180 мм скрепляются сваркой, двигателей 4А с высотой оси вращения 200 мм и более — скобами.

Все размеры активных частей, за исключением размеров, являющихся исходными при проектировании (воздушный зазор, число и форма пазов статора и ротора и размеры их шлицов), выбор и значения которых показаны в гл. 2, определялись на основе оптимизационных расчетов.

Идентичность критерия оптимизации, а также стоимостных показателей для отдельных участков серии обуславливает наличие определенных закономерностей в соотношениях размеров активных частей. Эти закономерности иллюстрируются усредненными данными, характерными для группы машин, объединенных общими признаками: число полюсов, класс нагревостойкости изоляции, толщина изоляции, вид обмотки и др. Внутренние диаметры и длины сердечников статора, двигателей, имеющих наибольшую мощность в вы-

оте оси вращения при данном числе полюсов, определялись на основе оптимизационных расчетов с последующим уточнением при конкретном проектировании. При этом шести- и восьмиполюсные двигатели с высотами оси вращения 112—160 мм имеют одинаковые внутренние диаметры статора, а двигатели с высотами оси вращения 71—100 и 180—250 мм одинаковую геометрию активной

Таблица 15-4

Соотношения	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
D_{i1}/D_{a1}	0,55	0,65	0,7	0,7
l_1/D_{a1} при IP44	0,49; 0,56	0,53; 0,65	0,52; 0,65	0,53; 0,65
l_1/D_{a1} при IP23	0,45; 0,51	0,48; 0,58	0,43; 0,54	0,51; 0,63

Примечание. В строке l_1/D_{a1} первая цифра относится к меньшей, а вторая — к большей длине сердечника.

асти, оптимальную для шестиполюсных двигателей. Такая унификация экономически оправдана в условиях массового производства. Средние значения соотношений главных размеров активных частей двигателей серии 4А приведены в табл. 15-4.

Двигатели серии 4А с высотами оси вращения 50—250 мм, а также десяти- и двенадцатиполюсные двигатели с высотами оси вращения 280—315 мм имеют полузакрытые трапециевидные пазы статора; двигатели с высотами оси вращения 280—355 мм — прямоугольные пазы статора (см. рис. 5-7, а). Пазы статора двигателей с высотами оси вращения 50—132 мм имеют овальную клиновую часть и плоское дно (см. рис. 5-6, б). У пазов статора двигателей с высотами оси вращения 160—200 мм трапециевидная клиновая часть (см. рис. 5-6, в), такая же форма пазов у десяти- и двенадцатиполюсных двигателей.

Пазы статора двигателей с высотами оси вращения 225—250 мм вально-трапециевидные (см. рис. 5-6, а).

Пазы ротора двигателей с высотами оси вращения 50—250 мм также трапециевидные овальные. Двигатели с высотами оси вращения 50—132 мм имеют полузакрытые трапециевидные пазы (см. рис. 5-8, б). Двигатели с высотами оси вращения 160—250 мм при $2p=4$, 6 и 8 имеют трапециевидные пазы, закрытые насыщающимся мостиком (см. рис. 5-8, в). Двухполюсные двигатели с высотами оси вращения 160—225 мм имеют закрытые пазы ротора (см. рис. 5-8, д). Такие же пазы имеют двигатели с высотами оси вращения 280—355 мм при $2p=4$. Двухполюсные двигатели с высотами оси вращения 250—355 мм имеют «бутылочные» пазы ротора (см. рис. 5-8, е).

В табл. 15-5 приведены усредненные соотношения некоторых размеров активных частей двигателей серии 4А.

Все двигатели с высотами оси вращения 50—132 мм и шести- полюсные двигатели с высотой оси вращения 160 мм для снижения уровня шума имеют скос пазов ротора на одно зубцовое деление статора. Двигатели с высотами оси вращения 160—355 мм выполнены без скоса пазов.

Двигатели с высотами оси вращения до 250 мм включительно выполняются со всыпной обмоткой из эмалированного провода круглого сечения. Обмотанный статор такого двигателя показан на

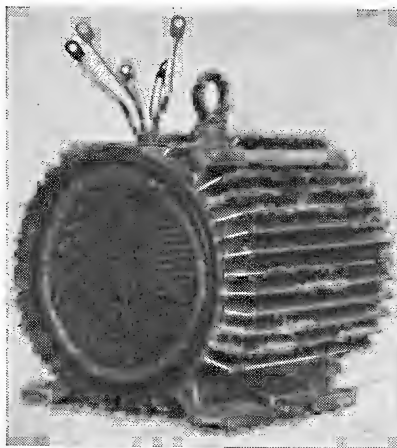


Рис. 15-8. Статор двигателя 4А.

рис. 15-8. Двигатели 4А с высотами оси вращения 50—160 мм имеют однослойную обмотку. Это позволяет использовать статорообмоточное оборудование, на котором производится непосредственный

Таблица 15.4

Диапазон высот оси вращения, мм	Класс нагревостойкости системы изоляции	Толщина пазовой изоляции, мм	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6, 8$
50—132 160—250	В F	До 0,25 0,4	h_{z1}/h_{a1}		
			0,4 0,35	0,5 0,48	0,58 0,53
50—132 160—250	В F	До 0,25 0,4	$b_{п1\text{ ср}}/t_1$		
			0,7 0,65	0,6 0,6	0,50 0,50
50—250	—	—	h_{z2}/h_{a2}		
			0,62	0,58	0,50

укладка обмотки в паз, а также оборудование с раздельной укладкой (втягиванием предварительно намотанных катушечных групп). Двигатели с высотами оси вращения 180—250 мм имеют симметричную одно-двухслойную обмотку, которая, сохраняя все преимущества двухслойной, позволяет механизировать процесс укладки методом раздельной намотки и укладки. Двигатели с высотами оси вращения 280—355 мм (кроме десяти- и двенадцатиполосных 280 и 315 мм) выполняются с обмотками из жестких полукатушек, укладываемых в полукрытые пазы статора. Обмотка этих двигателей двухслойная равносекционная.

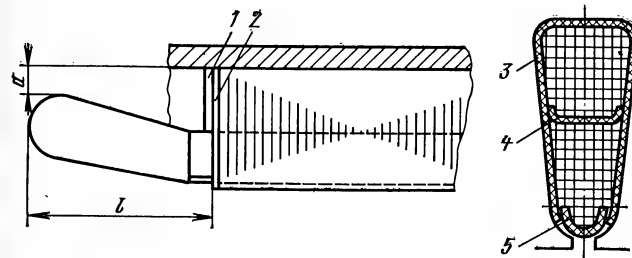


Рис. 15-9. Конструкция изоляции двигателя со всыпной обмоткой статора.

1 — изоляционный лист; 2 — крайний лист; 3 — пазовая коробочка; 4 — между- фазовая прокладка; 5 — крышка-клин.

Широкое внедрение механизации изолировочно-обмоточных работ повысило требования к прочности изоляционных материалов, а также потребовало специальной конструкции изоляции.

Характерными особенностями такой конструкции (рис. 15-9) являются:

замена твердого клина, применяемого для закрепления обмотки в пазу статора, крышкой-клином того же материала, что и пазовая коробочка, но, как правило, большей толщины;

применение крайних изолирующих листов в двигателях 4А с высотами оси вращения 160—250 мм, предохраняющих пазовую коробочку на выходе из паза;

пазовые коробочки с «манжетами», обеспечивающими, с одной стороны, усиление механической прочности изоляции на выходе из паза, с другой — ограничение перемещения пазовой коробочки в пазу при втягивании обмотки.

Катушечные группы обмоток, укладываемых механизированным способом, состоят из концентрически расположенных катушек с лобовыми частями прямоугольной формы. При ручной укладке применяются катушки с прямоугольной или трапециевидной формой лобовой части (см. гл. 4).

В двигателях с всыпной обмоткой, укладываемой ручным способом, применяются клинья из профильных стеклопластиков.

Обмотки двигателей 4А с высотами оси вращения 50—132 мм имеют изоляционную систему класса нагревостойкости В. Двигатели с высотами оси вращения 160—355 мм имеют изоляционную систему класса нагревостойкости F.

Обмотки короткозамкнутых роторов двигателей серии 4А (рис. 15-10) выполняются литыми из алюминия или его сплавов. Одновременно с заливкой пазов отливаются короткозамыкающие кольца с размещенными на них вентиляционными лопатками, а также штырями для крепления балансировочных грузов. В двигателях



Рис. 15-10. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя.

с высотами оси вращения до 100 мм на короткозамкнутом кольце отливаются кольцевые канавки, имеющие сечение «ласточкин хвост». В кольцевые канавки вставляются балансировочные грузы.

г) Конструкция подшипниковых узлов и валов

Двигатели серии 4А любой формы исполнения по способу монтажа имеют две подшипниковые опоры, одна из которых «плавающая» (обычно со стороны выступающего конца вала), а вторая — «фиксирующая». Подшипник, устанавливаемый в «фиксирующей» опоре, воспринимает радиальную и осевую нагрузку.

Установленный в «плавающей» опоре подшипник воспринимает только радиальную нагрузку и должен иметь возможность свободно перемещаться в аксиальном направлении с целью предотвращения заклинивания как при сборке двигателя, если детали имеют предельные отклонения размеров, которые сложились таким образом, что вызвали это заклинивание, так и вследствие теплового расширения. Возможность аксиального перемещения должна обеспечиваться либо самим подшипником (роликовый подшипник с гладким внутренним или наружным кольцом), либо конструкцией подшипникового узла, допускающей перемещение одного из колец подшипника относительно сопряженной с ним детали.

Подшипниковый узел состоит из подшипников, подшипниковых крышек, закрывающих подшипник с одной или двух сторон; элементов уплотнения; фиксирующих и крепежных деталей (шайб, стопорных колец, гаек и т. д.).

В двигателях с высотами оси вращения до 132 мм применяются подшипники серии 180 000 с двусторонним уплотнением и постоянной заложеной смазкой, рассчитанной на весь срок службы подшипника. Это позволяет существенно упростить конструкцию подшип-

никового узла за счет отказа от внутренней крышки, уплотняющих устройств, а в некоторых случаях и от наружной крышки, которая при этом выполняется заодно с подшипниковым щитом.

В двигателях больших высот оси вращения подшипниковые узлы имеют два исполнения: обычное (см. рис. 15-1 и 15-2) в двигателях, предназначенных для работы в нормальных климатических условиях и нормальных условиях эксплуатации, и исполнение, обеспечивающее пополнение и частичную замену смазки без разборки двигателя и отсоединения его от приводимого механизма (рис. 15-11). Эти подшипниковые узлы применяются для всех специализированных исполнений по условиям окружающей среды, а также когда при эксплуатации доступ к двигателю для его разборки и обслуживания затруднен.

В двигателях серии 4А применяются подшипники качения средней серии; в двигателях с высотами оси вращения до 60 мм оба подшипника шариковые, с высотами оси вращения 160 мм и выше — шариковый со стороны, противоположной приводу, и роликовый со стороны привода (кроме двухполюсных двигателей, где оба подшипника шариковые). В связи с повышенными требованиями по виброшумовым характеристикам применены подшипники класса точности 6. В двигателях фланцевого исполнения (М200 и М300) с высотами оси вращения 160—250 мм со стороны привода также применен шариковый подшипник, имеющий меньший радиальный зазор и обеспечивающий меньшее радиальное биение фиксирующей заточки опительного фланца подшипникового узла.

Подшипниковые крышки предназначены для защиты подшипника от воздействия внешней среды, а также для удержания смазки в зоне подшипника (в подшипниках без уплотнений). Выполняются подшипниковые крышки из чугуна, однако в малых машинах для «плавающей» опоры, где крышки несут чисто защитные функции и практически не воспринимают механических нагрузок в процессе работы, могут выполняться либо из алюминиевых сплавов, либо из непостоянной пластмассы.

Пружины осевого нажатия являются необходимым элементом подшипникового узла современного двигателя. Для уменьшения являющихся вибрации, вызванных наличием зазоров между тел качения и обоймами подшипника, применяется осевое нажатие наружную обойму подшипника. При этом имеет место постоянное касание (с определенным усилием) тел качения и дорожек качения на обойме подшипника.

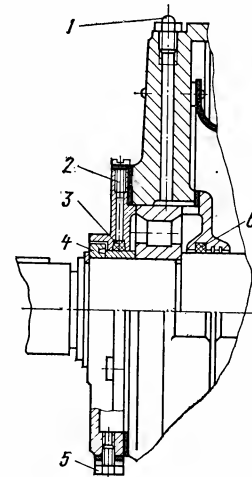
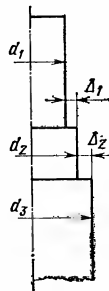


Рис. 15-11. Конструкция подшипникового узла с устройством для пополнения смазки.

1 — масленка; 2 — пробка; 3 — кольцо уплотнения; 4 — стопорное кольцо; 5 — пробка канала; 6 — войлочное уплотнение внутренней крышки подшипника.

Пружины осевого нажатия устанавливаются, как правило, на «фиксирующей» опоре. Однако, когда в «плавающей» опоре установлен шариковый подшипник, пружины должны устанавливаться в обеих опорах. Расчет пружин осевого нажатия приведен в гл. 10.

В двигателях основного исполнения применена самая простая форма бесконтактного (щелевого) уплотнения. Уплотняющее действие щели между валом и подшипниковой крышкой усилено двумя концентрическими жировыми канавками. Смазка, заполняющая жировые канавки, препятствует загрязнению подшипника. Как правило, эффективность такого уплотнения является вполне достаточной для регламентированных условий работы двигателей со степенью защиты IP44.



В двигателях специализированных исполнений по условиям окружающей среды применено комбинированное контактное уплотнение в виде войлочного кольца, усиленное лабиринтом в наружной крышке подшипника и щелевым уплотнением с жировыми канавками на внутренней.

Диаметр и длина выступающего конца вала двигателей серии 4А, как и остальные присоединительные ра-

Рис. 15-12. К выбору размеров вала.

меры, заданы в зависимости от главного установочного размера — высоты оси вращения двигателя. При этом в двигателях с высотой оси вращения до 132 мм размеры выступающего конца вала для всех частот вращения одинаковы, а с высотами оси вращения 160 мм и более двигатели на 3000 об/мин имеют меньшие размеры вала, чем двигатели на другие частоты вращения.

Таблица 15-10

h , мм	Номер подшипника	d_1 , мм	d_2 , мм	Δ_1 , мм	$d_3 \text{ min.}$, мм	$\Delta_2 \text{ min.}$, мм
56	180 501	11	12	0,5	17	2,5
63	180 502	14	15	0,5	20	2,5
71	180 604	19	20	0,5	17	3,0
80	180 605	22	25	1,5	32	3,0
90	180 605	24	25	0,5	32	3,0
100	180 606	28	30	1,0	37	3,0
112	180 607	32	35	1,5	44	4,0
132	180 609	38	45	3,5	54	4,0
160	310	48	50	1,0	60	5,0
180	312	55	60	2,5	72	6,0
200	313	60	65	2,5	77	6,0
225	314	65	70	2,5	82	6,0
250	317	75	85	5,0	99	7,0
280	317	80	85	2,5	99	7,0
315	319	90	95	2,5	109	7,0
355	322	100	110	5,0	124	7,0

Диаметр шейки вала d_2 под посадку подшипника (рис. 15-12) предварительно выбирается путем увеличения диаметра выступающего конца вала d_1 на Δ_1 , достаточную для упора ступицы муфты, шкива или шестерни. Обычно разность в диаметрах d_2 и d_1 не превышает 10 мм. Диаметр d_2 принимается равным ближайшему внутреннему диаметру подшипника.

Размеры буртика Δ_2 для упора подшипника определяются радиусом закругления и общей высотой внутреннего кольца подшипника. Чтобы обеспечивалась возможность демонтажа подшипника, высота буртика должна быть меньше высоты внутреннего кольца подшипника. Естественно, что все выбранные таким образом размеры подлежат последующей проверке при механическом и размерном расчетах (см. гл. 10). Упомянутые выше соотношения размеров вала для двигателей серии 4А приведены в табл. 15-6.

д) Конструкция вводных устройств

Вводные устройства двигателей серии 4А имеют несколько исполнений в зависимости от способа ввода питающего кабеля, его вида и соединения с выводами статорной обмотки. Вводные устрой-

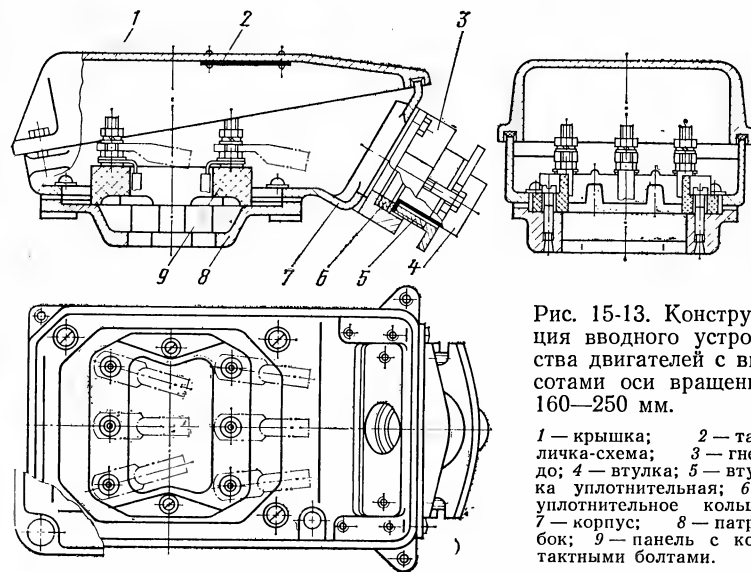


Рис. 15-13. Конструкция вводного устройства двигателей с высотами оси вращения 160—250 мм.

1 — крышка; 2 — табличка-схема; 3 — гнездо; 4 — втулка; 5 — втулка уплотнительная; 6 — уплотнительное кольцо; 7 — корпус; 8 — патрубков; 9 — панель с контактными болтами.

ства допускают присоединение гибкого металлического рукава и кабелей с медными или алюминиевыми жилами с оболочкой из резины или пластика. Двигатели мощностью 30 кВт и выше при напряжении 220 В, а также двигатели с высотами оси вращения 50—63 мм допускают присоединение кабелей только с медными жилами. Ввод кабеля предусмотрен через один или два штуцера,

а также через удлинитель под сухую разделку или заливку кабельной массой. Расположено вводное устройство на верху двигателя в двигателях с высотами оси вращения 50—250 мм и сбоку — в двигателях больших высот оси вращения.

Конструкция вводного устройства (рис. 15-13) допускает разворот с фиксацией на 90 или 180°; при этом поворачивается только корпус. Панель вместе с закрепленными на ней выводными концами обмотки статора остается неподвижной. Это дает возможность легко осуществлять поворот вводного устройства непосредственно при установке двигателя на месте эксплуатации и гарантирует правильность подключения выводов обмотки.

15-3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

а) Энергетические показатели

Энергетические показатели двигателей серии 4А — к. п. д. и коэффициент мощности — были получены в результате оптимизационных расчетов по сопоставлению затрат на изготовление и эксплуатацию двигателей за нормативный срок окупаемости. Значение энергетических показателей двигателей серии 4А со степенью защиты IP44 показаны на рис. 15-14 и 15-15.

Так как оптимизационные расчеты проводились при коэффициенте загрузки по мощности, равном 0,6, то энергетические показатели двигателей достаточно высоки и при частичных нагрузках.

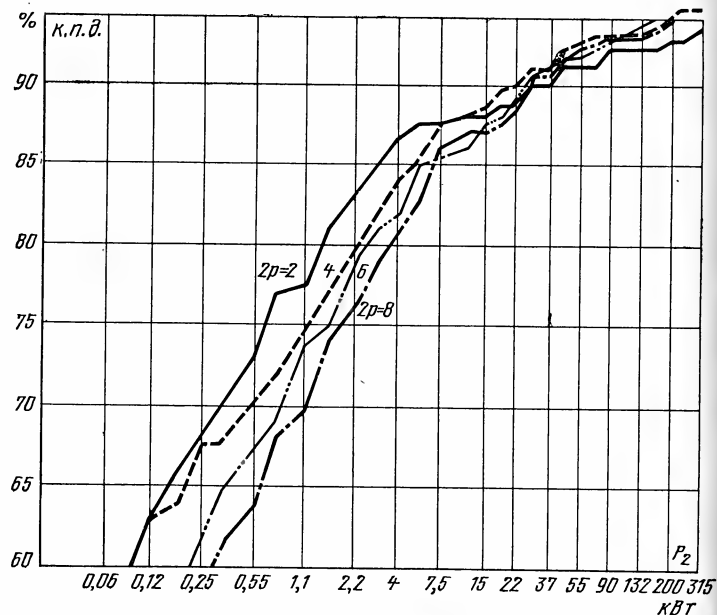


Рис. 15-14. Коэффициент полезного действия двигателей серии 4А.

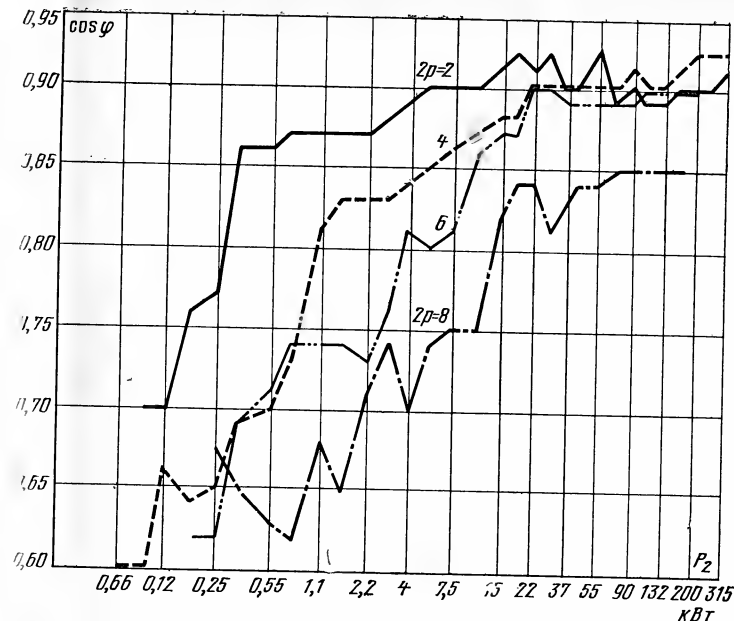


Рис. 15-15. Коэффициент мощности двигателей серии 4А.

б) Пусковые характеристики

Пусковые характеристики двигателей серии 4А основного исполнения соответствуют условиям прямого запуска механизмов. В табл. 15-7 приведены значения кратности начального пускового, максимального и минимального моментов, а также кратности начального пускового тока двигателей серии 4А (каталожные значения).

Целесообразность приведенного в табл. 15-7 уровня пусковых характеристик подтверждается многолетней практикой эксплуатации двигателей. Для механизмов с тяжелыми условиями пуска в серии 4А предусмотрена специальная модификация — двигатели с повышенным пусковым моментом.

в) Виброшумовые характеристики

Благодаря применению рациональной конструкции вентиляционных и подшипниковых узлов, повышенной точности механической обработки сопрягаемых поверхностей, выбору благоприятных соотношений числа пазов статора и ротора, применению подшипников повышенной точности и другим мероприятиям уровень шума двигателей серии 4А в целом несколько меньше требований ГОСТ 6372-77 (для машин первого класса) и на 4—5 дБ (по шкале А) ниже, чем у двигателей серии АО2.

$P_2, \text{кВт}$	$M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$				$M_{\text{М}}/M_{\text{НОМ}}$				$M_{\text{Н}}/M_{\text{НОМ}}$				$I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}$			
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
0,06	—	2,0	2,0	—	1,8	1,7	—	—	—	2,2	—	—	4,0	—	—	—
0,09	2,0	2,1	2,2	—	1,8	1,7	—	—	—	2,2	—	—	4,0	—	—	—
0,12	2,0	2,1	2,2	—	1,8	1,7	—	—	—	2,2	—	—	4,0	—	—	—
0,18	2,0	2,1	2,2	—	1,8	1,7	—	—	—	2,2	—	—	4,0	—	—	—
0,25	2,0	2,0	2,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	2,2	2,2	1,7	4,0	3,0	3,0	3,0
0,37	2,0	2,0	2,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	2,2	2,2	1,7	4,0	3,0	3,0	3,0
0,55	2,0	2,0	2,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	2,2	2,2	1,7	4,0	3,0	3,0	3,0
0,75	2,0	2,0	2,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	2,2	2,2	1,7	4,0	3,0	3,0	3,0
1,1	2,0	2,0	2,0	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	2,2	2,2	1,7	4,0	3,0	3,0	3,0
1,5	2,1	2,1	2,1	1,9	1,4	1,6	1,6	1,3	1,3	2,2	2,2	1,9	4,0	3,0	3,0	3,0
2,2	2,1	2,1	2,1	1,9	1,4	1,6	1,6	1,3	1,3	2,2	2,2	1,9	4,0	3,0	3,0	3,0
3,0	2,1	2,1	2,1	1,9	1,4	1,6	1,6	1,3	1,3	2,2	2,2	1,9	4,0	3,0	3,0	3,0
4,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	2,4	2,4	2,2	5,0	5,0	5,0	5,0
5,5	2,0	2,0	2,0	1,9	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	2,4	2,4	2,2	5,0	5,0	5,0	5,0
7,5	2,0	2,0	2,0	1,9	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	2,4	2,4	2,2	5,0	5,0	5,0	5,0
11,0	1,7	2,2	2,2	1,4	1,5	1,7	1,7	1,0	1,0	3,0	3,0	2,2	7,5	7,5	6,0	6,0
15,0	1,4	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
18,5	1,4	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
22,0	1,4	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
30,0	1,4	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
37,0	1,4	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
45,0	1,4	1,3	1,3	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
55,0	1,4	1,3	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,3	2,3	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
75,0	1,2	1,2	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	1,0	1,0	2,3	2,2	2,0	7,5	7,5	6,0	6,0
90,0	1,2	1,2	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	0,9	0,9	2,3	2,2	2,0	7,5	7,5	6,0	6,0
110,0	1,2	1,2	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	0,9	0,9	2,3	2,2	2,0	7,5	7,5	6,0	6,0
132,0	1,2	1,3	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	0,9	0,9	2,3	2,2	2,0	7,5	7,5	6,0	6,0
160,0	1,2	1,3	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	0,9	0,9	2,3	2,2	2,0	7,5	7,5	6,0	6,0
200	1,2	1,3	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	0,9	0,9	2,3	2,2	2,0	7,5	7,5	6,0	6,0
250	1,0	1,2	1,3	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	2,2	2,2	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0
315	1,0	1,2	1,3	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	2,2	2,2	2,0	7,0	7,0	6,0	6,0

Действительный уровень шума двигателей серии 4А со степенью защиты IP44 описывается в зависимости от мощности выражением

$$L_{d1A} = k_L \lg P_2 + B_L,$$

где L_{d1A} — средний уровень звука на расстоянии 1 м от контура машины; k_L , B_L — коэффициенты, значения которых приводятся в табл. 15-8.

Таблица 15-8

Коэффициент	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
k_L	13,7	10,2	10,8	10,8
B_L	64,5	61,6	57,2	57,2

Средний уровень звука двигателей со степенью защиты IP23 (22) примерно на 5 дБ (по шкале А) ниже, чем двигателей со степенью защиты IP44.

Допустимый уровень наибольшей эффективной вибрационной скорости двигателей серии 4А приводится в табл. 1-9.

15-4. МОДИФИКАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

а) Двигатели с повышенным пусковым моментом

В серии 4А двигатели с повышенным пусковым моментом (4АР) предусмотрены в диапазоне высот оси вращения 160—250 мм при частотах вращения 1500, 1000 и 750 об/мин. По шкале мощностей, шкале установочных размеров и их взаимной увязке двигатели 4АР соответствуют основному исполнению серии. Пусковые характеристики двигателей 4АР приведены в табл. 15-9.

Таблица 15-9

Параметр	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
$M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$	2,0	2,0	1,2
$M_{\text{кр}}/M_{\text{НОМ}}$	2,2	2,2	2,0
$M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}$	1,6	1,6	1,5
$I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}$	7,5	7,6	6—5,5

Двигатели 4АР спроектированы и выпускаются на базе основного исполнения со степенью защиты IP44 соответствующих типовых размеров и унифицированы с последними по всем конструктивным элементам и главным размерам активной части и размерам пазов статора.

Повышение пускового момента в двигателях 4АР достигается за счет увеличения магнитного потока в среднем на 10% по сравнению

Таблица 15-10

$h, \text{ мм}$	$2p=4$		$2p=6,8$		$b_0, \text{ мм}$
	$q_{c,п}/q_{c,р}$	h_0/h_{z2}	$q_{c,п}/q_{c,р}$	h_0/h_{z2}	
160	0,6	0,06	0,3	0,06	2
180	0,45	0,075	0,3	0,075	2
200	0,4	0,08	0,3	0,075	2
225	0,25	0,075	0,3	0,075	2
250	0,2	0,1	0,2	0,075	2

нно с базовыми машинами основного исполнения (без увеличения длин сердечников) и применения ротора с двойной беличьей клеткой. В табл. 15-10 приведены отношения площадей пусковой и рабочих клеток ротора ($q_{c,п}/q_{c,р}$), отношения высоты перемычки между клетками к общей высоте паза (h_0/h_{z2}) и ширина перемычки b_0 для двигателей 4АР.

Коэффициент полезного действия двигателей 4АР в основном соответствует к. п. д. двигателей основного исполнения, а коэффициент мощности за счет более высоких индукций в участках магнитной цепи ниже, чем у соответствующих двигателей основного исполнения, на 0,01—0,03 при $2p=4$ и на 0,03—0,07 при $2p=6$ и 8.

б) Двигатели с повышенным скольжением

Двигатели с повышенным скольжением рассчитаны для работы в повторно-кратковременном режиме S 3—S 5 по ГОСТ 183-74 при продолжительности включения ПВ=15, 25, 40 и 60%.

Таблица 15-11

$h, \text{ мм}$	Условная длина сердечника, статорных	$P_2, \text{ кВт (при ПВ=40\%)}$				$h, \text{ мм}$	Условная длина сердечника, статорных	$P_2, \text{ кВт (при ПВ=40\%)}$			
		$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$			$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
71	A	1,0	0,63	0,42	—	160	S	—	16	12	9,0
	B	1,2	0,9	0,63	0,3		M	—	19	17	12,5
80	A	1,9	1,3	0,8	0,45	180	S	—	21	—	—
	B	2,5	1,7	1,2	0,6		M	—	26,5	20	15
90	L	3,5	2,4	1,7	0,9	200	M	—	31,5	22	20
100	S	4,8	3,2	—	—		L	—	40	28	—
	L	6,3	4,25	2,6	1,6	225	M	—	50	33,5	26,0
112	MA	—	—	3,2	2,2	250	S	—	56	40	36
	MB	8,0	5,6	4,2	3,2		M	—	63	45	—
132	S	—	8,5	6,3	4,5						
	M	11,8	11,8	8,5	6,0						

В серии 4А двигатели с повышенным скольжением (4АС) предусмотрены в диапазоне высот оси вращения 71—250 мм при частотах вращения 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. Номинальные мощности двигателей 4АС относятся к повторно-кратковременному режиму с продолжительностью включения ПВ=40%. Шкала мощностей, шкала установочных размеров и их взаимная увязка для двигателей 4АС приведены в табл. 15-11.

Мощность двигателей в режимах с отличной от 40% продолжительностью включения ориентировочно определяется по формуле

$$P_{2ПВ} = BP_{2ПВ=100\%} (ПВ)^{\beta}.$$

Значения коэффициента В и показателя степени β приводятся в табл. 15-12.

Таблица 15-12

Параметр	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
$M_{п}/M_{ном}$	2,1	2,0	2,0	1,9
$M_{кр}/M_{ном}$	2,2	2,2	2,1	2,0
$M_{max}/M_{ном}$	1,6	1,6	1,6	1,6
$I_{п}/I_{ном}$	5,5—7,5	4,5—7,0	4,0—6,5	3,5—6,0
B	2,5	2,5	2,5	2,6
β	—0,25	—0,23	—0,26	—0,29

Скольжение двигателей 4АС при номинальной мощности находится в пределах 14—5%. Критическое скольжение составляет не менее 40%.

Пусковые характеристики двигателей 4АС приведены в табл. 15-12.

Двигатели 4АС спроектированы и выпускаются на базе основного исполнения двигателей 4А со степенью защиты IP44 и унифицированы с ними по всем конструктивным и активным элементам, за исключением ротора. С целью увеличения сопротивления клетки роторы двигателей 4АС заливаются алюминиевым сплавом АКМТ повышенного сопротивления ($\rho=1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). В двигателях с высотами оси вращения более 112 мм сечение паза ротора уменьшено по сравнению с базовой машиной в 1,3—2,5 раза. В двигателе 4АС с высотами оси вращения до 112 мм размеры пазов ротора сохранены, а магнитный поток по сравнению с двигателями основного исполнения увеличен в среднем на 10%.

в) Многоскоростные двигатели

В серии 4А предусмотрены многоскоростные двигатели с сочетаниями синхронных частот вращения, приведенными в гл. 1.

Многоскоростные двигатели выполнены на базе односкоростных основного исполнения со степенью защиты IP44 с использованием сердечников статора и в ряде случаев сердечников ротора базовых машин. В двигателях с высотами оси вращения 160—250 мм в большинстве случаев используется двойная клетка ротора, унифицированная с клеткой ротора двигателей с повышенным пусковым мо-

Таблица 15-13

Номинальная мощность, кВт, при синхронной							
h, мм	Условная длина сердечника, станины	1500/3000	750/1500	500/1000	1000/1500		750/1000
		Δ/YY (схема Даландера)			$h=100$ мм, YYY $h=160$ мм, Δ/YY	$h=112$ мм $2p=4, \text{ Y}$ $2p=6, \text{ Y}$	$2p=8, \text{ Y}$ $2p=6, \text{ Y}$
					Одна обмотка		
56	A B	0,1/0,14 0,12/0,18	— —	— —	— —	— —	— —
63	A B	0,19/0,265 0,224/0,37	— —	— —	— —	— —	— —
71	A B	0,55/0,80 0,75/1,1	— —	— —	— —	— —	— —
80	A B	1,1/1,5 1,5/2,0	— —	— —	— —	— —	— —
90	L	2,0/2,5	—	—	—	—	—
100	S L	2,65/3,4 3,2/4,2	1,0/1,7 1,4/2,4	—	1,8/2,1 2,5/2,8	—	0,7/0,9 1,0/1,3
112	MA MB	4,2/5,0 —	1,9/3,0 2,2/3,6	—	—	2,8/3,2	1,1/1,3 1,4/1,7
132	S M	6,0/6,7 8,5/9,5	3,2/5,3 4,2/7,1	—	—	4,0/4,5 6,0/6,2	2,4/2,6 2,8/3,2
160	S M	11,0/14,0 14,0/17,0	6,0/9,0 9,0/13,0	—	7,1/8,5 11,0/13,0	—	5,3/6,0 7,5/8,8
180	S M	18,0/21,0 22,0/26,5	13,0/18,0	6,7/11,0	—	—	10,0/11,8
200	M L	— 33,5/37,0	17,0/25,0 20,0/28,0	9,0/14,0 10,0/17,0	—	—	13,0/18,0 15,0/18,0
225	M	42,5/45,0	22,4/33,5	12,5/22,0	—	—	18,5/22,1
250	S M	50,0/60,0 60,0/71,0	30,0/45,0 37,0/55,0	16,0/28,0 18,5/35,5	—	—	24,0/30,0 28,0/37,0

Частоте вращения, об/мин, и схеме соединения

1000/1500/3000	750/1000/3000	750/1000/1500	750/1000/1500/3000	500/750/1000/1500
$2p=6, \text{Y}$ $2p=4/2, \Delta/\text{YY}$	$2p=8, \text{Y}$ $2p=4/2, \Delta/\text{YY}$	$2p=6, \text{Y}$ $2p=8/4, \Delta/\text{YY}$	$2p=8/6, \Delta/\text{YY}$ $2p=4/2, \Delta/\text{YY}$	$2p=8/4, \Delta/\text{YY}$ $2p=12/6, \Delta/\text{YY}$
Две независимые обмотки				
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
1,0/1,1/1,5 1,4/1,5/2,1	0,63/1,1/1,5 0,9/1,5/2,1	0,71/0,9/1,3 0,9/1,2/1,7	0,5/0,63/0,9/1,1 0,7/0,85/1,0/1,4	—
1,6/2,2/2,8 —	1,1/1,9/2,2 —	1,0/1,1/1,5 1,2/1,4/2,1	—	—
2,8/3,6/4,2 3,8/5,0/6,0	1,8/3,0/3,6 2,4/4,5/5,0	1,9/2,2/3,2 2,6/2,8/4,5	—	—
4,8/5,3/7,5 6,7/7,5/10,5	3,8/4,25/6,3 5,0/7,1/9,5	4,0/4,5/7,5 5,0/6,3/10,0	—	1,8/4,0/4,25/6,7
—	—	8,0/10,0/12,5	—	3,0/5,0/6,0/8,0
—	—	11,0/12,0/18,5 14,0/15,0/21,0	—	5,0/8,0/8,5/12,0 —
—	—	17,0/18,5/25,0	—	7,1/12,5/13,0/ /20,0
—	—	20,0/22,0/30,0 25,0/28,0/37,0	—	9,0/17,0/18,5/ /26,5 12,0/22,0/24,0/ /30,0

ментом. Многоскоростные двигатели серии 4А выполняются со степенью защиты IP44.

Шкала мощностей и ее увязка с установочными размерами и частотами вращения, а также особенность выполнения обмоток многоскоростных двигателей серии 4А приводятся в табл. 15-13.

г) Двигатели со встроенным электромагнитным тормозом

Двигатели со встроенным электромагнитным тормозом применяются в электроприводах механизмов, где по условиям технологического процесса требуется немедленно остановить механизм после отключения двигателя от сети. Режим работы двигателей — повторно-кратковременный с частыми пусками под нагрузкой (S4 по ГОСТ 183-74). Двигатели рассчитаны на менее чем на 120 пусков в час при продолжительности включения ПВ=40%.

В серии 4А двигатели со встроенным электромагнитным тормозом предусмотрены в высотах оси вращения 56—160 мм, со степенью защиты IP44. Конструкция тормозного устройства показана на рис. 15-16. Работа устройства происходит следующим образом. При включении двигателя одновременно подается напряжение на катушку тормозного электромагнита 5. Якорь электромагнита 3, притягиваясь к ядру 4, сжимает пружины, освобождая тормозной диск 6. Двигатель начинает вращаться. При отключении двигателя от сети катушка электромагнита обесточивается, якорь освобождается и под действием пружин прижимается

Рис. 15-16. Тормозная система двигателя 4А100.

1 — вентилятор; 2 — тормозной элемент; 3 — якорь; 4 — ядро; 5 — катушка тормозного электромагнита; 6 — тормозной диск.

к тормозному диску. Двигатель останавливается. Тормозные элементы 2 выполнены из металлокерамики или материалов на основе поликарбонидной композиции. В последнем случае предусматривается возможность перемещения тормоза в осевом направлении. Охлаждение осуществляется вентилятором двигателя 1, проталкивающим охлаждающий воздух через тормозную систему. Нажатие пружин регулируется либо специальной пробкой, запирающей пружину в направляющем гнезде, либо специальной втулкой, передающей усилие на все пружины одновременно. Двигатели со встроенным электромагнитным тормозом по активным частям полностью унифицированы с дви-

гателями основного исполнения, а из конструктивных элементов используются станина, подшипниковый щит, детали подшипникового узла и вентилятор наружного обдува базовой конструкции основного исполнения.

Приводом тормозной системы является электромагнит постоянного тока, обеспечивающий срабатывание (растормаживание) тормозной системы при пуске двигателя и удержание ее в расторможенном состоянии в рабочем режиме. В двигателях со встроенным электромагнитным тормозом с высотами оси вращения 56—100 мм питание тормозного магнита осуществляется от сети через специальное выпрямительное устройство. В больших двигателях для обеспечения растормаживания системы в заданное время необходимо форсировать усилие тормозного магнита при пуске двигателя. Такая форсировка обеспечивается за счет пускового тока двигателя. Такая

В двигателях серии 4А тормозное устройство обеспечивает тормозной момент не менее $1,5 M_{ном}$.

Время торможения t_r и время растормаживания t_p в зависимости от высоты оси вращения двигателя не превышает значений, приведенных в табл. 15-14.

Таблица 15-14

h , мм	t_p , мс	t_r , мс
56—100	100	40
112—160	200	100

д) Двигатели с фазным ротором

В серии 4А двигатели с фазным ротором предусмотрены с высотами оси вращения 160—250 мм со степенью защиты IP44 (4АК160-250) и с высотами оси вращения 160—355 мм со степенью защиты IP23 (4АНК160-355). Шкала мощностей двигателей 4АК,

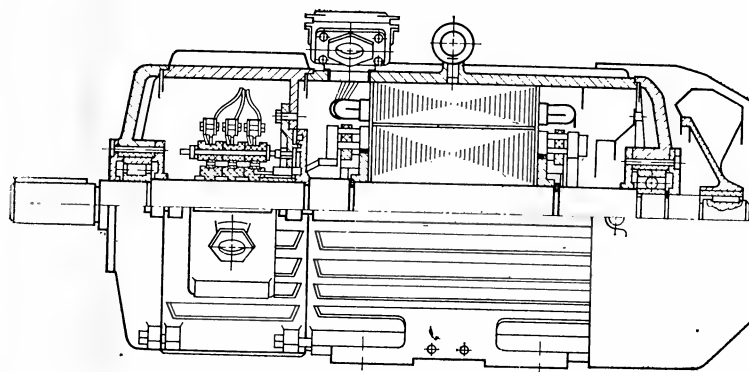


Рис. 15-17. Двигатель с фазным ротором 4АК200 (степень защиты IP44).

Таблица 15-15

h, мм	Условная длина сердечника, станины	Мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин									
		1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500
		IP44					IP23				
160	S	10	7,5	5,5	—	—	15	—	—	—	—
	M	13	10	7,5	—	—	18,5	—	—	—	—
180	S			10	—	—	22	15	11	—	—
	M	18,5	13	—	—	—	30	18,5	15	—	—
200	M	22	18,5	15	—	—	37	22	18,5	—	—
	L	30	22	—	—	—	45	30	22	—	—
225	M	37	30	22	—	—	55	37	30	—	—
250	SA	45	—	—	—	—	75	45	37	—	—
	SB	55	37	30	—	—	90	55	45	—	—
	M	75	45	37	—	—	110	75	55	—	—
280	S	—	—	—	—	—	132	90	75	—	—
	M	—	—	—	—	—	160	110	90	—	—
315	S	—	—	—	—	—	200	132	110	75	55
	M	—	—	—	—	—	250	160	132	90	75
355	S	—	—	—	—	—	315	200	160	110	90
	M	—	—	—	—	—	400	250	200	132	110

4АНК и ее связь с установочными размерами приведены в табл. 15-15.

Охлаждение двигателей со степенью защиты IP44 (рис. 15-17) осуществляется вентилятором наружного обдува. Контактные кольца расположены внутри оболочки (со стороны выступающего конца вала в двигателях с высотами оси вращения 200 мм и выше и со стороны вентилятора в двигателях с высотами оси вращения 160—180 мм) и закрыты специальным кожухом. Полость контактных колец отделена от полости статора специальной перегородкой с лабиринтными уплотнениями, предотвращающими попадание щеточной пыли на обмотки статора и ротора.

Двигатели со степенью защиты IP23 выполнены с двумя системами вентиляции. В двигателях с высотами оси вращения 160—200 мм аксиальная система вентиляции (рис. 15-18). Охлаждение осуществляется центробежным вентилятором, расположенным со стороны, противоположной выступающему концу вала. Для выхода воздуха подшипниковый щит со стороны вентилятора снабжен окнами, расположенными в нижней части боковой поверхности щита. Двигатели с высотами оси вращения 225—355 мм имеют симметричную радиальную вентиляцию, как и двигатели с короткозамкнутым ротором. Нагнетательными элементами служат лопасти, припаянные к хомуткам роторной обмотки. Узел контактных колец вынесен за пределы станины.

Станина, один подшипниковый щит, сердечник статора и вводные устройства унифицированы с короткозамкнутыми машинами соответствующих типоразмеров.

В двигателях с фазным ротором серии 4А применены два вида роторных обмоток: выпная из круглого провода для двигателей с высотами оси вращения 160—200 мм и стержневая из медной проволоки прямоугольного сечения для двигателей с высотами оси вращения 225—355 мм.

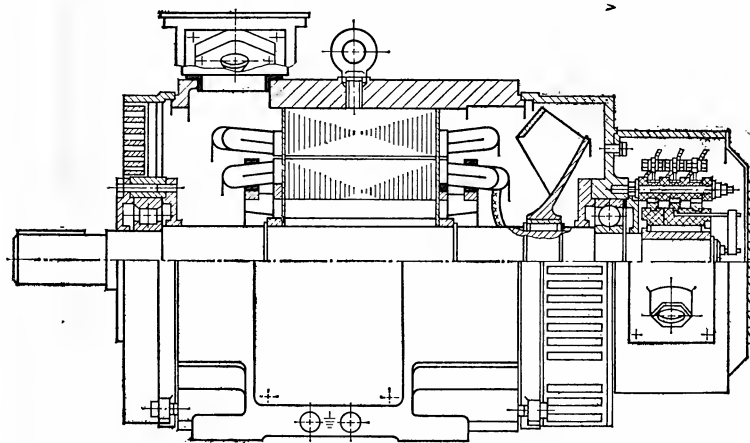


Рис. 15-18. Двигатель с фазным ротором 4АНК200 (степень защиты IP23).

Числа пазов на полюс и фазу ротора q_2 , принятые в двигателях с фазным ротором серии 4А, приведены в табл. 15-16.

Катушки роторов со выпной обмоткой имеют трапецевидную форму лобовых частей и укладываются в полузакрытые пазы сердечника ротора. Изоляция пазов по конструкции и применяемым материалам аналогична изоляции пазов статора со выпной обмоткой.

Изоляция стержней обмотки ротора двигателей с высотами оси вращения свыше 200 мм представляет собой гильзу, накладываемую на пазовую часть стержня. В качестве гильзы применяется компо-

Таблица 15-16

h, мм	q_2 при числе полюсов				
	4	6	8	10	12
160	3,0	2,0	1,5	—	—
180—200	3,0	3,0	2,0	—	—
225	5,5	4,5	3,5	—	—
250—355	6,0	4,5	3,5	3,5	3,0

электрический материал на основе синтетической бумаги и пленки. Лобовая часть изолируется лентой на синтетической основе, усиленной слоем стеклянной ткани. Для защиты изоляции стержня от повреждения при укладке предусматривается пазовая коробочка из пленкостеклоткани. Система изоляции ротора по нагревостойкости соответствует классу F.

Узел контактных колец двигателей с высотами оси вращения до 250 мм (рис. 15-19, а) состоит из опрессованных пластмассой контактных колец 1 с токоотводами. На торцах пластмассовой части

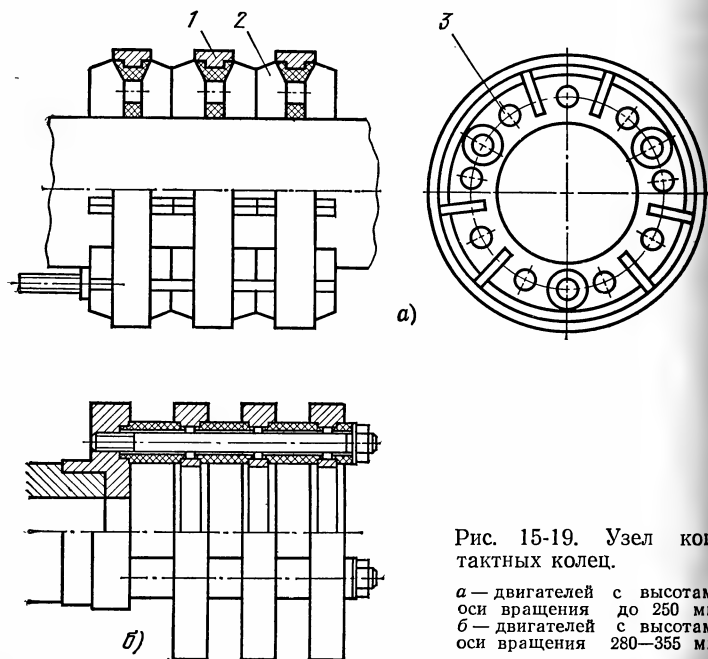


Рис. 15-19. Узел контактных колец.

а — двигателей с высотами оси вращения до 250 мм;
б — двигателей с высотами оси вращения 280—355 мм.

каждого кольца расположены вентиляционные лопатки 2, обеспечивающие засасывание охлаждающего воздуха через отверстия 3 в пространство между кольцами. При перемещении воздуха происходят интенсивное охлаждение колец и удаление с поверхностей узла щеточной пыли.

В двигателях с высотами оси вращения 280—355 мм применена консольная конструкция узла контактных колец (рис. 15-19, б). На несущем фланце, жестко закрепленном на валу двигателя с помощью трех стяжных шпилек, консольно крепятся кольца. Между кольцами установлены дистанционные втулки из пластмассы с отверстиями для прохода стяжных шпилек. Выводные концы обмотки ротора крепятся непосредственно к кольцам без дополнительных токоотводов.

е) Малошумные двигатели

Для этой модификации двигателей серии 4А установлены требования по уровню шума не ниже класса 3 по ГОСТ 16372-77, т. е. они должны иметь общий уровень на 10 дБ (по шкале А) ниже, чем двигатели основного исполнения с уровнем шума по классу 1.

Наибольшее эффективное значение виброскорости не превышает значений, указанных в табл. 15-17.

Таблица 15-17

h, мм	56—80	90—132	160
Виброскорость, мм/с	0,7	1,1	1,8

Двигатели выполняются на базе двигателей основного исполнения с высотами оси вращения 56—160 мм со степенью защиты IP44 и отличаются от последних следующим: снижены электрические и магнитные нагрузки; уменьшен внешний диаметр вентилятора наружного обдува; увеличен воздушный зазор между статором и ротором, введена механическая обработка внутренней поверхности сердечника статора, обеспечивающая равномерность воздушного зазора; увеличен скос пазов ротора (1,5 зубцовых деления статора); применена двухслойная обмотка статора вместо однослойной.

Мощность малошумных двигателей соответствует мощности двигателей основного исполнения. Для обеспечения снижения шума и вибрации механического происхождения в двигателях применены малошумные подшипники с гарантированными виброшумовыми характеристиками.

Подшипниковые узлы двигателей обеспечивают более жесткую фиксацию ротора, что уменьшает его осевой люфт. Вентиляторы двигателей выполняются из пластмассы.

15-5. ВСТРАИВАЕМЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Встраиваемые двигатели являются формой основного исполнения по способу монтажа. Двигатели представляют собой сердечник статора с обмоткой и залитый алюминием (или сплавом на основе алюминия) сердечник ротора без вала. Единственной отличительной особенностью сердечника статора являются удлиненные выводные концы.

Двигатели имеют два исполнения по способам охлаждения: с собственным вентилятором, поставляемым в комплекте с двигателем (исполнение М534 по ГОСТ 2479-65), и без вентилятора (М533). В первом случае вентилятор насаживается на общий вал совместно с сердечником ротора, во втором охлаждение двигателя должно обеспечиваться посторонним источником.

При встраивании двигателя в исполнительный механизм должны быть обеспечены необходимые поперечные сечения каналов для прохода охлаждающего воздуха. Значения этих сечений указываются в нормативных документах. Там же приводится необходимое количество охлаждающего воздуха при встраивании двигателя без собственного вентилятора.

15-6. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А МОЩНОСТЬЮ ДО 100 кВт

Производство асинхронных двигателей единых серий является массовым. Каждая высота оси вращения содержит большое количество исполнений и модификаций, получаемых из унифицированных элементов.

Высокая степень унификации деталей электродвигателей различных исполнений и модификаций (в пределах одной высоты оси вращения) позволяет производить их на одном оборудовании с незначительными его переналадками или совсем без переналадок. Типичным для современного электромашиностроительного завода массового производства является выпуск 0,5—1 млн. электродвигателей меньших высот оси вращения или 300—500 тыс. одной или двух соседних средних и старших высот оси вращения. Такие объемы выпуска однотипных машин вполне соответствуют принципам организации массового производства.

На базе серии выпускаются и узкоспециализированные исполнения, значительно разунифицированные с основным. Выпуск этих специальных двигателей невелик, и производство их выделяется в специальные участки или цехи, оснащенные универсальным или специализированным оборудованием.

Проектирование технологии производства двигателей серии 4А производилось параллельно с разработкой конструкции, что дало возможность значительно сократить сроки подготовки и освоения производства. Для упорядочения проектирования комплексного технологического процесса, создания и ввода производственных мощностей исходя из оптимальной производительности важнейших технологических агрегатов был рассчитан оптимальный объем выпуска одной технологической линейки для каждой высоты оси вращения.

Расчетные объемы выпуска одной технологической линейки в дальнейшем использовались при заказе и проектировании специального оборудования, разработке планов специализации предприятий, проектировании строительства новых и реконструкции существующих.

Рассмотрим основные элементы технологии производства двигателей серии 4А мощностью до 100 кВт.

а) Литейное производство

Детали оболочки двигателей серии 4А с высотами оси вращения до 250 мм изготавливаются только литыми. Несмотря на наличие большого количества типов исполнений, литые детали в основном однотипны, что дает возможность свести к минимуму количество технологических разработок и широко применять типовые технологические процессы производства отливок.

Станины и щиты электродвигателей серии 4А отливаются из чугуна или алюминиевых сплавов.

Технологический процесс изготовления чугунных отливок включает смесеприготовление, формообразование, плавку, заливку, выбивку форм, очистку, обрубку и грунтовку отливок. Смешивание составных частей песчано-глинистых формовочных смесей произво-

дится в смешивающих бегунах как периодического, так и непрерывного действия. Для выравнивания влажности смеси ее помещают в бункер-отстойник, из которого разрыхленная смесь системой ленточных транспортеров и элеваторов направляется на формовочный участок.

Формовка, заливка и выбивка чугунных подшипниковых щитов электродвигателей серии 4А с высотами оси вращения 71—132 мм производятся на автоматических линиях безопочной формовки фирмы «Диза» пескострульно-прессовым методом с производительностью 250—300 форм в час.

Чугунные отливки щитов электродвигателей серии 4А с высотой оси вращения 160 мм изготавливаются на автоматизированном участке методом прессования под высоким давлением; в состав участка входят автоматическая прессовая линия модели НЛ-01 конструкции НИИ тракторсельхозмаш, состоящая из двух формовочных блоков; конвейер с кантователями полуформ и автоматическая выбивка. Производительность автоматической прессовой линии — 150 форм в час.

Отливки щитов электродвигателей серии 4А с высотами оси вращения 180 и 200 мм изготавливаются на автоматических линиях модели НЛ-01 и ДМ 2032 фирмы Дизза, а с высотами оси 225 и 250 мм — на универсальных формовочных машинах.

Отливки станин электродвигателей 4А с высотами оси вращения 71—100 мм изготавливаются на автоматических линиях моделей 7215А и 7225 в оболочковые формы. Производительность такой автоматической линии — 40 форм в час при шести — восьми отливках в одной форме.

Для изготовления отливок станин электродвигателей серии 4А с высотами оси вращения 112—180 мм применяются автоматические линии модели А82М (рис. 15-20). Заливка производится в металлические формы, облицованные песчано-смоляной оболочкой толщиной 5—8 мм.

Применение кокильной технологии позволяет повысить точность чугунных отливок, существенно улучшить качество их поверхности ликвидировать пригар. Механизацию и автоматизацию литья в кокиль осуществить проще, чем в песчаные формы, в связи с меньшим числом технологических операций. При этом увеличиваются съем литья с единицы производственной площади и выпуск на одного работающего, уменьшается (примерно на 15%) масса отливок по сравнению с изготовлением в песчаных формах.

Центровые стержни для станин 4А160 изготавливаются из плакированных песчано-смоляных смесей в нагреваемых ящиках на стержневых полуавтоматах модели 4544Б конструкции НИИавтопром.

Мелкие стержни для станин и фланцевых подшипниковых щитов производятся также по нагреваемой оснастке на полуавтоматах модели 4509 конструкции НИИавтопром.

Станины электродвигателей с высотами оси вращения 225 и 250 мм производятся на универсальных формовочных машинах типа FK108.

Основными плавильными агрегатами на электромашиностроительных заводах являются вагранки или индукционные печи. Индукционные печи применяются в качестве основных плавильных агрегатов или в качестве миксеров для перегрева и доводки по химическому составу чугуна.

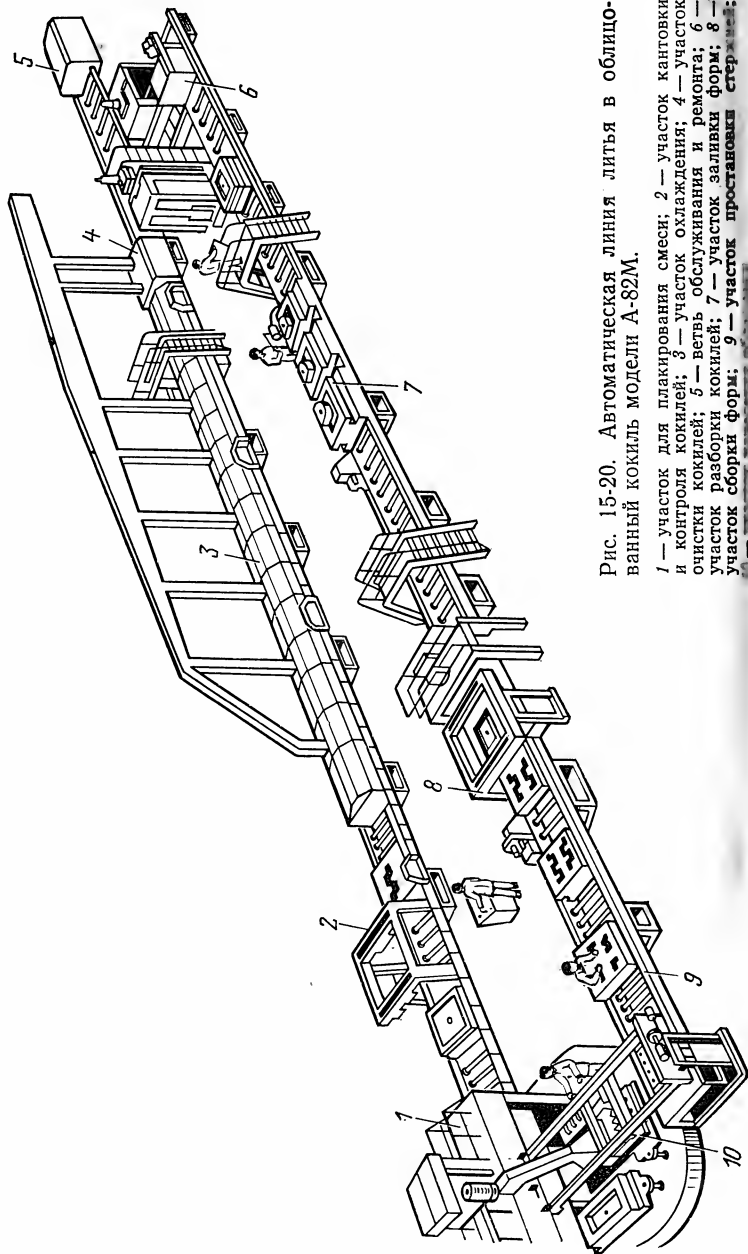


Рис. 15-20. Автоматическая линия литья в облицованный кокиль модели А-82М.

1 — участок для плакирования смеси; 2 — участок окладки и контроля коклей; 3 — участок охлаждения; 4 — участок очистки коклей; 5 — ветвь обслуживания и ремонта; 6 — участок разборки коклей; 7 — участок заливки форм; 8 — участок сборки форм; 9 — участок протаскивания стержней; 10 — участок протаскивания стержней.

При производстве литья в кокиль отливки после извлечения из формы направляются на термообработку для снятия отбела и релаксации внутренних напряжений. Затем литье подвергается финишной обработке, включающей очистку в дробеметных камерах, зачистку и грунтовку.

При отливке деталей электродвигателей из алюминиевых сплавов плавка последних осуществляется в электрических печах сопротивления, а отливка — на машинах литья под давлением. Технология производства отливок из цветных сплавов на машинах литья под давлением не отличается от аналогичного производства в других отраслях.

Плавка металла для заливки роторов производится в основном в индукционных печах типов ИАТ-0,4 и ИАТ-1,0. В качестве раздаточных используются электрические печи сопротивления с графитовыми тиглями. Заливка роторов двигателей с высотами оси вращения до 225 мм осуществляется на машинах литья под давлением моделей 512Г, СР2255, 2ЛНМ.

Для роторов двигателей с высотами оси вращения 125 мм и выше применяется заливка в кокиль на вибрационных или центробежных установках с предварительным нагревом сердечников в электропечах сопротивления.

б) Штамповка и термообработка. Сборка сердечников

Количество штампуемых для асинхронных двигателей мощностью 0,25—100 кВт статорных и роторных листов превысило в настоящее время 2,5 млрд. шт. в год. Трудоемкость этой операции составляет 10% общей трудоемкости изготовления электродвигателей, а грузооборот штамповочных цехов подотрасли превысил 300 тыс. т только электротехнической стали в год, не считая других материалов. Штамповка листов магнитопроводов двигателей серии 4А осуществляется на прессах-автоматах, работающих на рулонной электротехнической стали.

Наряду с некоторыми прогрессивными конструкциями отечественных прессов-автоматов (с нижним приводом типов АА-6230 и АА-6232, типа «Бакинец» моделей А-6032 и А-6034) предприятия отрасли получили за последние годы большое количество импортных современных быстроходных автоматических прессов: PR-250 фирмы «Гримар» (Франция); PASZ-160 (ГДР); А2-200 чехословацкого производства (по лицензии фирмы «Шуллер», ФРГ).

Пресс-автоматы современной конструкции обладают большой быстроходностью (скорости подачи ленты 40—50 м/мин против 15—20 м/мин у прессов старых моделей). Все новые прессы оснащены разматывающими устройствами для работы на рулонном материале. Практикой установлено, что только за счет замены полосового материала на прессах-автоматах рулонным повышается производительность на 25—30%. Применение рулонного материала дает также возможность производить двухрядную штамповку листов магнитопроводов младших габаритов на 4-позиционных последовательных штампах. Кроме значительной (около 8%) экономии материала за счет шахматного раскроя полосы, при двухрядной штамповке почти в 2 раза повышается производительность.

Для термообработки листов магнитопровода из стали марки 2013 на заводах смонтированы проходные ролланговые печи типа

1СРЗ-14-140-7/9х-300А (рис. 15-21). Листы магнитопроводов в эти печи загружаются на горизонтальных оправках, устанавливаемых в специальные поддоны; коэффициент заполнения листами рабочей длины оправок около 0,8 (для предотвращения спекания). Технологический процесс термообработки состоит из обжига, рекристаллизационного отжига, оксидации и охлаждения. Обжиг листов производится в специальной камере 2 с усиленной вентиляцией при тем-

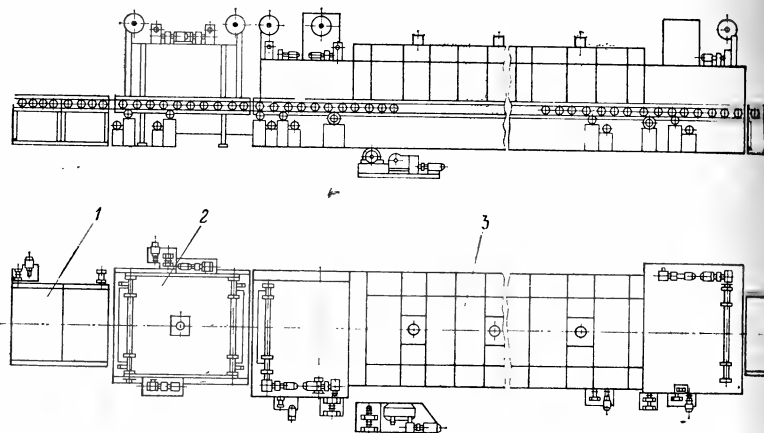


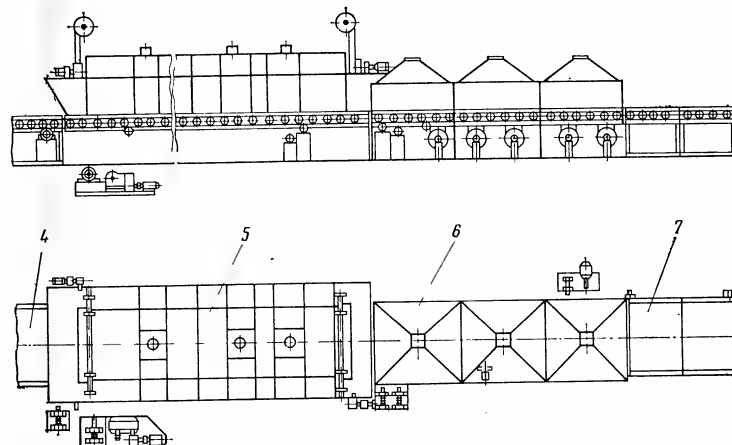
Рис. 15-21. Электропечь сопротивления 1СРЗ-14-140-7/9х-300А.

1 — загрузочный рольганговый стол; 2 — камера обжига; 3 — камеры нагрева, выдержки и обезуглероживания; 4 — камера оксидации; 5 — камера охлаждения; 6 — камера охлаждения; 7 — разгрузочный

пературе 350—380°C от 30 до 40 мин для удаления с поверхности листов смазки и масла, остающихся после штамповки. Затем поддон перемещается в печь, состоящую из камер нагрева, выдержки и обезуглероживания, где листы нагреваются до 870°C в среде экзотермического газа, предотвращающего окисление. Общее время прохождения камер нагрева, выдержки и обезуглероживания — 150 мин. В следующей камере — контролируемого охлаждения 3 — поддоны продуваются воздухом и охлаждаются до 560°C, после чего подаются в камеру оксидации 5. Эта камера заполнена воздухом, дополнительно в нее подается водяной пар, смесь воздуха и пара перемешивается вентилятором. Оксидация производится при 560°C в течение 1 ч. В камере 6 поддоны с листами охлаждаются до 400—300°C и передаются в камеру воздушного охлаждения, откуда при температуре 80—50°C выдаются на выдвижной стол для разгрузки 7.

Обогрев печи газозлектрический; печь комплектуется газоприготовительной установкой, вырабатывающей экзогаз. Мощность, потребляемая печью, 940 кВт. Производительность 1200 кг/ч, время разогрева 18 ч. Длина печи 60 м, занимаемая вместе с газоприготовительной установкой площадь 800 м². Время полного цикла термообработки около 7 ч.

Сборка и сварка сердечников статора двигателей 4А71-180 осуществляются на полуавтоматах моделей СМ-25, П2С и др. Сердечники ротора собираются и свариваются на полуавтоматах моделей СМ-16, СМ-34 и др. Полуавтоматы созданы Харьковским институтом ВНИИТЭлектромаш. Сварка сердечника производится двумя электродами, не плавящимися в среде аргона. Цикл работы станка — 1 мин.



выдержки, обезуглероживания и контролируемого охлаждения; 4 — стол перегрузочный.

в) Механическая обработка

Механическая обработка деталей и сборочных единиц электродвигателей массовых серий уже в 50—60-е годы была переведена на специальное автоматизированное оборудование. Необходимо отметить, однако, что технологические процессы механообработки и специальное оборудование, разработанные для первой и второй серий (А и А2), не обеспечивали достаточной точности и стабильности.

При переходе на серию 4А механообработка деталей и сборочных единиц двигателей не претерпела кардинальных изменений, но для обеспечения большей точности и чистоты обработки, повышения производительности труда почти все оборудование было создано вновь с учетом повышения уровня механизации, надежности в эксплуатации, обеспечения технологической точности. Были вновь разработаны также и сами технологические процессы в основном с целью повышения качества обработанных деталей и введены некоторые дополнительные чистовые операции.

Станины электродвигателей 4А из алюминиевых сплавов обрабатываются на двух специальных агрегатных станках. На первом станке выполняются расточка станин под сердечник статора и некоторые сверлильные операции, на втором — основные сверлильные и

резьбонарезные операции. На обоих станках одновременно обрабатываются две станины. Производительность станка 160—170 станин в час. Обслуживает каждый станок один рабочий.

Обработка чугунных станин электродвигателей 4А с высотами оси вращения от 71 до 132 мм производится на автоматических линиях модели 059—1 (рис. 15-22) производства завода «Fogland» (г. Плауен, ГДР). Линии не имеют спутников: передача деталей с позиции на позицию выполняется с помощью транспортера и специальных захватов. Детали в линиях расположены горизонтально, что позволяет вести обработку одновременно с двух сторон, благодаря чему сокращаются количество рабочих позиций и площадь, занимаемая линией. На каждой позиции линии устанавливаются и одновременно обрабатываются по две детали. В начале и в конце линии расположены накопители. Заготовки станин по две штуки автоматически подаются из накопителя на линию, готовые детали автоматически передаются в накопитель.

Предусмотрено охлаждение деталей и инструмента в процессе резания с одновременным смывом и удалением стружки. Линии имеют автономную установку с магнитными фильтрами для очистки охлаждающей жидкости.

Станки снабжены механизмами, автоматически контролирующими поломку кондового инструмента, а также устройством автоматического контроля точности размера, формы отверстия под сердечник статора. Производительность такой линии — 50—80 станин в час. Линия обслуживается двумя рабочими.

Станины электродвигателей 4А160-250 обрабатываются на многопозиционных агрегатных станках производства Минского завода автоматических линий (МЗАЛ). В поточной линии обработки станины шесть станков, причем два из них (на четвертой операции — расточка под пакет статора) работают параллельно. Технологический процесс предусматривает, как и при обработке станин меньших высот оси вращения, работу с охлаждением, базирование и закрепление детали на первой операции с минимальными деформирующими усилиями, расточку под сердечник статора за три прохода с перезакреплением, позволяющим внутренним напряжениям в отливке релаксироваться после черновых проходов. При чистовой расточке закрепление детали производится за обработанный торец, противоположный базовому, с помощью прихватов с регулируемым аксиальным усилием.

Производительность комплекта агрегатных станков соответствует мощности технологической линейки соответствующей высоты оси вращения. Разработаны и внедрены средства механизации для связи комплекта агрегатных станков (6 шт.) в единый комплексно-механизированный участок. Средства механизации состоят из автооператоров и смонтированного вдоль линии станков транспортера. Система осуществляет гибкую связь между станками: позволяет работать каждому станку независимо от других в пределах емкости межоперационного накопителя, которым является в данном случае транспортер. Наряду с комплектами агрегатных станков для обработки станин 4А160-180 применяются автоматические линии производства ГДР.

Чугунные подшипниковые щиты электродвигателей 4А71-132 обрабатываются на специальных агрегатных станках станкостроительного завода «ВЕМА-Заальфельд», ГДР. Станок семипозиционный с круглым вращающимся столом, на станке производится пол-

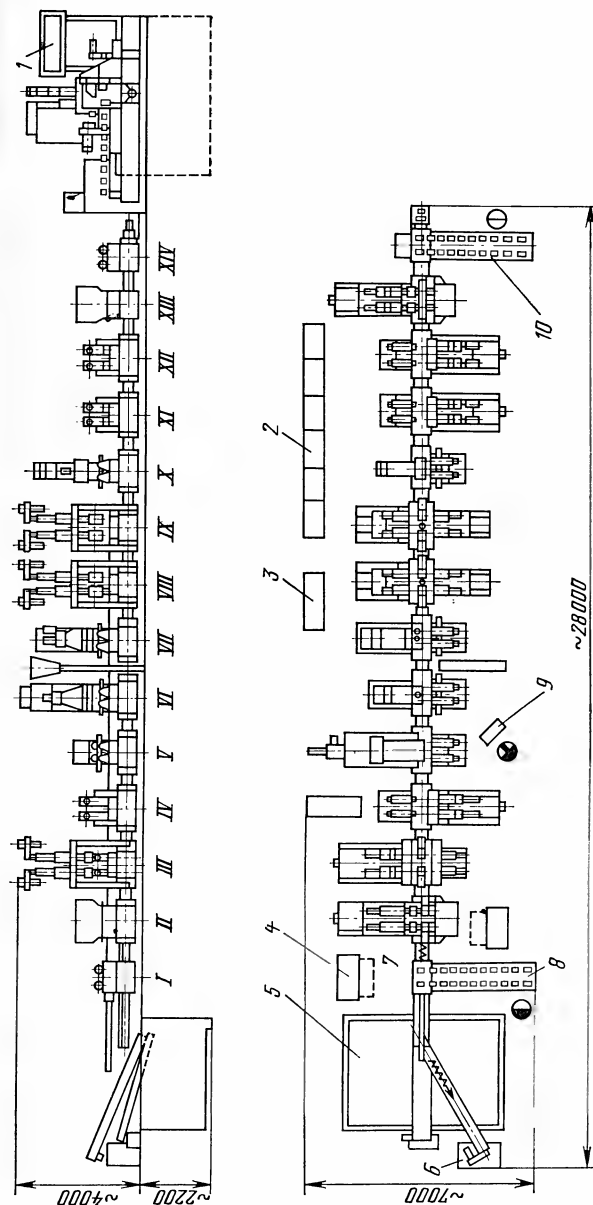


Рис. 15-22. Автоматическая линия для обработки чугунных станин электродвигателей 4А71-132.

1 — сигнальное табло; 2 — электрошкаф; 3 — гидравлический агрегат; 4 — инструментальный шкаф; 5 — агрегат охлаждения; 6 — резервуар для стружки; 7 — шнековый транспортер для стружки; 8 — накопитель заготовок; 9 — главный пульт управления; 10 — накопитель готовых деталей.

ная механическая обработка щита. Весь цикл операций обработки деталей автоматизирован, в том числе операции установки и снятия детали со станка. Они выполняются автооператором с применением кассет, являющихся одновременно оборотной тарой. Для закрепления деталей применяется осевой зажим с опорами против места приложения зажимного усилия.

Перед чистовой обработкой происходит автоматическое перезажатие детали и последующее зажатие с уменьшенным усилием, что устраняет причины, вызывающие деформации щита, и обеспечивает необходимую точность обработки. На станках предусмотрено охлаждение деталей и инструмента в процессе резания с одновременным удалением стружки. Для очистки охлаждающей жидкости имеются установки с магнитными фильтрами.

Станки снабжены механизмами, автоматически контролирующими полумку сверл и метчиков, а также точность размера и формы замка и отверстия под подшипник. При выходе за пределы допуска включается световая сигнализация и станок останавливается.

Для обработки щитов 4A71-132 станки поставляются в комплекте по 5 шт., в том числе четыре параллельно работающих для замковой стороны и один станок для обработки фланцевого щита. Производительность комплекта согласуется с мощностью технологической цепочки соответствующей высоты оси вращения и составляет 23—48 щитов в час.

Щиты электродвигателей 4A160-250 обрабатываются на вертикальных многошпиндельных токарных полуавтоматах отечественного производства (модели 1284 и 1283). Отверстия в ушах и ступице просверливаются на специализированных сверлильных станках с многошпиндельными головками (на базе 2A170), отверстия для крепления кожуха — на специальных агрегатных станках Харьковского завода (по типу ХА4889). Таким образом, полная обработка передних щитов двигателей 4A160-250 производится за две и задних — за три операции.

Обработка валов электродвигателей 4A71-132 производится на автоматических линиях производства станкозавода «Герман Матерн», ГДР (рис. 15-23). В состав линии входят два фрезерных и два токарных станка, шлифовальный станок и транспортная система. Станки загружаются и разгружаются с помощью портально-рейферных устройств.

Линии снабжены устройствами автоматического контроля глубины центрального отверстия, диаметров валов после токарных операций и диаметров валов на шлифовальных станках. Такт работы линии в зависимости от размеров вала составляет 0,85—1,48 мин.

Исследованиями установлено, что требующаяся точность узла вал — ротор может быть обеспечена только при окончательной обработке узла в сборе, причем ротор с валом должен собираться в нагретом состоянии.

Залитый сердечник ротора нагревается в автоматической многопозиционной индукционной установке, в которой перенос ротора с позиции на позицию осуществляется «шагающей балкой». Общее время нагрева пакета ротора 4A160 — 12—15 мин, такт выдачи роторов индукционным нагревателем — 1,25 мин. Ротор нагревается до температуры 500—520°C. Для сборки с валом достаточно более низкой температуры (350—400°C), но нагрев до 500°C преследует цель провести одновременно отрыв стержней клетки ротора от листов сердечника за счет различия температурных коэффициентов

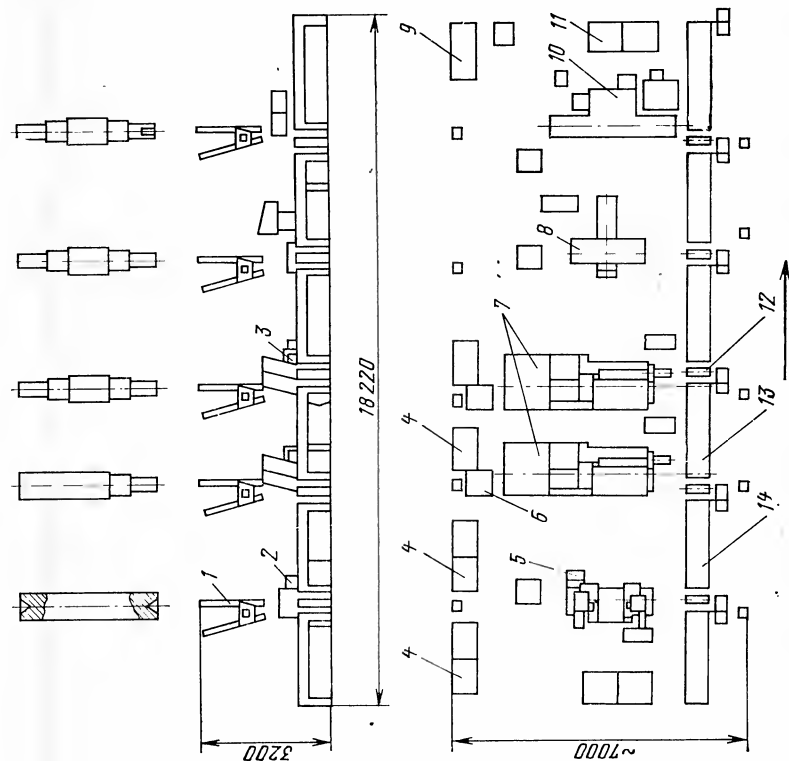


Рис. 15-23. Автоматическая линия для обработки валов электродвигателей 4A71-100.

1 — портально-рейферное устройство; 2 — прибор контроля наличия центральных отверстий; 3 — прибор контроля диаметров валов; 4 — электрошкафы управления; 5 — фрезерно-центральный станок; 6 — шкаф для инструментов; 7 — гидрокопировальные токарные станки; 8 — токарный станок; 9 — гидравлический шкаф транспортной системы; 10 — фрезерный станок; 11 — кассета; 12 — передаточное устройство; 13 — промежуточный цепной транспортер; 14 — цепной подъемный транспортер.

объемного расширения материалов клетки и сердечника. В результате повышается переходное сопротивление между клеткой и сердечником ротора и уменьшаются добавочные потери в двигателе.

После того, как вал вводится в нагретый ротор и фиксируется в определенном положении, производится ускоренное охлаждение ротора.

Механическая обработка ротора с валом для двигателей 4А71-132 производится также на автоматических линиях завода «Герман Матерн» (ГДР). Линия состоит из трех станков, из которых два шлифовальных и один токарный — для обточки пакета ротора.

Сердечник ротора обрабатывается круглыми самовращающимися резцами, закрепленными в быстросменных резцедержателях (ротационное резание). Последней операцией обработки узла является динамическая балансировка, которая производится на балансировочных автоматах (например, модели ОП-2) или на универсальных балансировочных станках моделей ДБ-50; ДБ-102. Валы и роторы электродвигателей 4А160-200 обрабатываются по аналогичной технологии.

Обработка вентиляторов, подшипниковых крышек и деталей вводного устройства двигателей с высотами оси вращения до 250 мм включительно выполняется на специальных высокопроизводительных агрегатных станках моделей ХА-9406 и ХА-8933А, спроектированных и изготовленных специально для данных деталей.

Обработка крышек производится на токарных шестишпиндельных полуавтоматах модели 1А290П6.

г) Обмоточно-изолировочные и пропиточные работы

В отличие от старых серий, при обмотке статоров которых до 80% операций выполнялось вручную, в серии 4А весь комплекс статорообмоточных операций для двигателей мощностью до 100 кВт механизирован. Первая операция этого процесса — изолирование пазов статора — осуществляется на станках-полуавтоматах отечественного производства конструкции ВНИИТЭлектромаш (модели ИПС-3-4; ИПС-5М; ИПС-8; ИС-4), зарекомендовавших себя как надежное и производительное (до 400 статоров в смену) оборудование.

В станке материал формируется по форме пазы и подается в паз статора. Усилие подачи коробочки в паз контролируется предохранительной муфтой. Все операции, кроме установки и снятия сердечника, автоматизированы. Станки легко перестраиваются на разные числа пазов и на различные исполнения статоров.

Следующая операция — укладка обмотки в пазы статора. Станки для укладки обмотки, имеющие в настоящее время промышленное применение, работают по двум принципиально различным схемам: 1) непосредственная укладка проводников в паз; 2) раздельная намотка секции и пересыпка их в пазы статора.

На станках непосредственной укладки провод протягивается через ролики в фильеру проводопроводителя. На нем установлены специальные пальцы, при помощи которых провод протаскивается в паз и забрасывается на пластины и крючья, образующие лобовые части. Проводопроводитель совершает сложное возвратно-поступательное движение вдоль оси (провод проводится через паз) и вращательное — вокруг оси статора (образуется лобовая часть). Примером

такого станка может служить станок серии WST-660 («Электромат», ГДР).

Возвратно-поступательное движение ограничивается длиной катушки, вращательное — шагом обмотки; количество движений соответствует числу витков в катушке. При работе на статорообмоточных станках с непосредственной укладкой из-за значительных механических воздействий провод вытягивается в длину на 10—11%. При этом неравномерно по длине соответственно увеличивается активное сопротивление катушки. Изменяются характеристики двигателя.

Более эффективными являются станки, работающие по схеме раздельной намотки. Как правило, комплекс такого станка состоит из двух агрегатов. На первом наматываются на шаблоны секции, которые на специальной оправке переносятся на второй агрегат с установленным на нем сердечником статора. Здесь секции втягиваются в паз на один ход, после чего производится заклиновка рулонным синтетическим материалом. Применение метода раздельной намотки значительно повышает производительность (комплект станков, обслуживаемый двумя рабочими, дает 180—200 статоров 4А71-80 в смену), ликвидировать вытяжку провода, снижает количество «крестов» в пазу. Примером такого оборудования может служить статорообмоточный комплекс станков НК-7 и ОСР-3, разработанных ВНИИТЭлектромаш для намотки секций и укладки их в пазы электродвигателей с высотами оси вращения 112—132 мм.

На станке НК7 производится намотка катушечных групп электродвигателя. Шаблон размещается на планшайбе шпинделя станка. С помощью раскладчика осуществляется однорядная намотка. Все операции (намотка, обрезка, пересыпание на съемник и т.д.) производятся автоматически от гидросистемы. Наматанные и пересыпанные на съемник катушки оператор, повернув вручную манипулятор, передает к всыпному станку ОСР-3. Станок автоматически всыпает, заклинивает и поэтапно формирует обмотки. Катушки укладываются на оправку, куда устанавливается статор, закрепленный на подвижной каретке. Происходит одновременное всыпание и заклинивание в пазах. Подвижная каретка переходит на формовочную позицию, где происходит отжим лобовых частей. Для всыпания второго яруса катушек цикл повторяется. Аналогичный комплекс станков моделей НК-7 и ОСР-4 (рис. 15-24) разработан и изготовлен для статоров двигателей 4А-160. Такие станки выпускают также фирмы «Форт-Вайн» (США), «Фиккерт» (ФРГ), «Павези» (Италия).

Опрессованные статоры бандажированы на станках типа БС, разработанных ВНИИТЭлектромаш. Бандажирование производится лавсановым шинором повышенной прочности, при этом игла проходит в просветы между катушками, делает петлю и затягивает ее.

Разработка комплекса автоматизированного статорообмоточно-оборудования, охватывающего практически все операции технологического процесса (кроме установки межфазовых прокладок и сборки схемы), позволила создать комплексно-механизированные линии, объединив процесс единой транспортной системой. Заканчивается такой участок автоматическим контрольным стендом, после которого статор поступает на пропитку.

Пропитка статоров двигателей с высотами оси вращения до 180 мм осуществляется капельным (струйным) методом пропиточными составами без растворителей на специальных роторных уста-

новках УПС конструкции ВНИИТэлектромаш. Лак подается регулируемой струйкой из сопла на лобовую часть обмотки, статор в этот момент медленно вращается, а ось его наклонена в вертикальной плоскости. Лак растекается по проводникам лобовой части, затекает в паз. Статор при этом нагревается пропускаемым по обмотке током промышленной частоты, что способствует вначале процессу повышения жидкотекучести лака, уменьшению его вязкости, а затем — отверждению.



Рис. 15-24. Комплекс статорообмоточных станков моделей НК-7 и ОСР-4.

Такт работы установки 1,2 мин (на статорах 4А80). Роторная двухъярусная пропиточная установка УПС-4 имеет 18 позиций. На первой устанавливают и подключают непропитанные статоры, а также снимают готовые. Цикл пропитки статора 20—30 мин. Статоры двигателей больших габаритов, а в ряде случаев и двигателей 4А100-132 пропитываются в вакуум-пропиточных установках АВВ фирмы «Хитека» (ВНР) лаками на растворителях.

Пропитка на установках АВВ производится по следующей технологической схеме. Статоры, навешенные на конвейер по несколько штук, проходят через сушильную печь, затем попадают в камеру пропитки. Камера герметически закрывается, в ней создается вакуум для отсасывания воздуха между проводниками, после этого в камеру подается лак и снова проводится вакуумирование для отсоса паров растворителя. После выдержки в течение 3 мин лак удаляется из пропиточной камеры; статоры проходят в печи ступенчатую сушку. Передвижение конвейера со статорами — пульсирующее, оптимальный такт установки — 7,5 мин. Время пропитки и сушки одного статора — 5 ч.

д) Сборка, испытания и окраска электродвигателей

Асинхронный двигатель собирается из двух основных сборочных единиц: статора и ротора — и целого ряда деталей: подшипниковых щитов, подшипниковых крышек, деталей вводного устройства, кожуха вентилятора и т. д. Ротор приходит на сборочный участок в собранном и окончательно обработанном виде. Статор собирается на отдельном участке или механизированной линии. Обмотанный статор запрессовывается в станину и стопорится; затем на специальных станках производятся чистовая обточка замков, чистовое фрезерование плоскости лап и сверление установочных отверстий в лапах. Во время выполнения этих операций лобовые части обмоток тщательно закрываются во избежание попадания в обмотку стружки. После запрессовки сердечника в станину чистовая обточка замков производится с базированием статора на его внутреннюю поверхность, что обеспечивает необходимую concentricity замков с осью отверстия сердечника статора. Затем, базирясь на окончательно обработанный замок, производят чистовую фрезеровку плоскости лап и сверлят в них установочные отверстия.

Далее следует общая сборка электродвигателя, которая выполняется на пульсирующих сборочных конвейерах или на комплексно-механизированных линиях сборки (конструкции Харьковского института ВНИИТэлектромаш).

Комплексно-механизированная линия моделей ЛНҚ-8 и ЛНҚ-10 оснащена специальным полуавтоматическим оборудованием, приспособлениями и инструментами, связанными транспортной системой с принудительным ритмом. Рабочие места располагаются с обеих сторон линии. При этом выполняются такие операции, как продувка статора, сборка ротора с подшипниками и заведение его в статор, установка подшипниковых щитов на статор и их закрепление, смазка подшипников, установка и закрепление крышек подшипниковых щитов, установка вентилятора и кожуха, сборка вводного устройства. Такт работы линии ЛНҚ-8 на сборке двигателей 4А71 — 30 с, 4А100 — 40 с. Далее двигатель поступает на испытательную станцию. Технология изготовления узлов и деталей электродвигателей серии 4А обеспечивает их взаимозаменяемость и исключает необходимость в пригоночно-регулировочных работах при сборке. Поэтому сборочные работы удастся полностью механизировать, обеспечить принудительный ритм, а их трудоемкость составит не более 9% общей трудоемкости изготовления электродвигателя.

Испытания двигателей проводятся на автоматизированных контрольно-испытательных станциях АИМ-16 или АИМ-18.

Собранные двигатели устанавливаются на рабочую позицию транспортера испытательной станции, и оператор производит подключение. Далее в процессе перемещения двигателя измеряются сопротивление изоляции, ток и потери холостого хода и короткого замыкания; испытывается электрическая прочность межвитковой и корпусной изоляции; производится обкатка на холостом ходу.

Время контрольных испытаний электродвигателя (вместе с обкаткой) составляет около 15 мин, темп работы АИМ-16 — 30 с; АИМ-18 — 39—45 с. Управление конвейером и испытательными участками производится с помощью программного устройства и конечных выключателей, расположенных по ходу транспортера. Если контролируемый параметр выходит за пределы допуска, подается сигнал, дефектный двигатель отключается и маркируется по виду

брака. При этом ведется учет забракованных по каждому параметру электродвигателей.

Грунтование стальных и алюминиевых деталей электродвигателей 4А выполняется до механообработки на поточно-механизированных линиях, состоящих из агрегата струйного обезжиривания водными растворами, установки грунтования методом электрофореза и сушила. Грунтование чугунных деталей производится также до механообработки водоразбавляемыми грунтами, наносимыми методом электроосаждения или облива.

Первая окраска осуществляется также в деталях до механообработки на поточно-механизированных линиях методом пневмоэлектрораспыления. Сушка после окраски производится в электротерморadiационных сушилах. Окрашенные и высушенные детали направляются на механообработку и сборку. Полностью собранный электродвигатель окрашивается один раз эмалью на поточно-механизированных конвейерных линиях. Сушка эмали производится на этих же конвейерах в электротерморadiационных сушилах. Окрашенные электродвигатели без съема и перевешивания транспортируются на склад готовой продукции, где осуществляются их консервация и упаковка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравчик Э. Д. Сравнение экономичности изменения коэффициента мощности и к. п. д. асинхронных двигателей. — Изв. вузов. Электромеханика, 1972, № 5, с. 553—555.
2. Комплексный подход к решению крупных отраслевых проблем на примере создания единой серии электродвигателей 4АН/Г. П. Вороновский, О. Л. Зинченко, А. Г. Иосифьян и др. — М.: Информэлектро, 1977. — 64 с.
3. Федюшкин В. Н., Петров В. М. Единые серии асинхронных электродвигателей в Советском Союзе. — Электротехника, 1977, № 11, с. 40—42.
4. Бергер А. Я. Выбор главных размеров электрических машин. — Л.: Энергия, 1972. — 88 с.
5. Шуйский В. П. Расчет электрических машин. — Л.: Энергия 1968. — 732 с.
6. Сорокер Т. Г., Воскресенский А. П., Мордвинов Ю. В. Применение ЦВМ для расчета и исследования асинхронных двигателей. — Труды III научно-технической конференции по применению вычислительной техники в электротехнической промышленности. — М.: ВНИИЭМ, 1971, с. 131—144.
7. Кузнецов Б. И. Метод предварительного определения главных размеров сердечника при проектировании серии асинхронных двигателей. — Электротехника, 1968, № 5, с. 5—9.
8. Гурин Я. С., Кузнецов Б. И. Проектирование серий электрических машин. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
9. Кравчик Э. Д. Коэффициент заполнения статора при обмотках из круглых проводов. — Электротехника, 1970, № 11, с. 25.
10. Гольдберг О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. — М.: Энергия, 1968. — 176 с.
11. Brochmann F., Ewropean J. H. Design trends in standard class F. a. c. motors. — Proc. 10-th Elec. Insulat. Conf. Chicago, 1971, vol. III, p. 96—99.
12. Кузнецов Б. И. О влиянии толщины изоляции на степень использования электрических машин. — Вестник электротехнической промышленности, 1956, № 4, с. 5—17.
13. Krecke W. New standard a. c. motors. — ASEA Journal, 1974, vol. 47, № 2, p. 27—33.
14. Кравчик А. Э., Стрельбицкий Э. К. Влияние исходных данных на геометрию и технико-экономические показатели асинхронных двигателей. — Электротехника, 1976, № 11, с. 28—30.
15. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. — М.: Энергия, 1964. — 264 с.

16. Гаинцев Ю. В. Влияние числа пазов ротора и статора на характеристики асинхронных двигателей. — Электротехника, 1972, № 8, с. 44—48.
17. Кравчик А. Э., Шлаф М. М. Электродвигатели серии 4А защищенного исполнения. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1974, вып. 3, с. 85—93.
18. Видмар М. Экономические законы проектирования электрических машин. — М.: ГОНТИ, 1924. — 109 с.
19. Постников И. М. Выбор оптимальных геометрических размеров в электрических машинах. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 115 с.
20. Трапезников В. А. Обобщенные условия соразмерности трансформаторов и электрических машин. — Электричество, 1946, № 2, с. 31—36.
21. Сорокер Т. Г. Применение автоматических цифровых вычислительных машин при проектировании новых серий асинхронных двигателей. — Доклад на научно-техническом совещании «Новые единые серии электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт». — М.: ВНИИЭМ, 1966, с. 14.
22. Палтерович Д. М. Планирование потребности в оборудовании. — М.: Экономика, 1972. — 223 с.
23. Забров В. И. Метод расчета экономической эффективности мероприятий по снижению производственного шума. Челябинский межотраслевой ЦНТИ: 1976, Инф. листок № 134—76.
24. Каган Б. М., Тер-Микаэлян Т. М. Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах. — М.: Энергия, 1964. — 592 с.
25. Каган Б. М., Даниленко С. Е. Применение случайного поиска с обучением при оптимальном проектировании асинхронных электродвигателей. — В кн.: Автоматика и вычислительная техника. — Рига: АН Латв. ССР, 1966, вып. 13, с. 169—172.
26. К вопросу о применении однослойных обмоток в короткозамкнутых асинхронных двигателях средней мощности/А. Э. Кравчик, Ф. К. Макаров, Ю. В. Гаинцев и др. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1972, вып. 2, с. 68—83.
27. Обмотки электрических машин/В. И. Зимин, М. Я. Каплан, М. М. Палей и др. — Л.: Энергия, 1975. — 488 с.
28. А. с. № 448551 (СССР). Способ укладки одно-двухслойной обмотки в пазы статора асинхронного электродвигателя с четным числом пар полюсов/Э. Д. Кравчик, Г. Я. Шкилько, А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф и др. Оpubл. в Б. И., 1974, № 40.
29. А. с. № 448552 (СССР). Способ укладки одно-двухслойной обмотки в пазы статора асинхронного электродвигателя с нечетным числом пар полюсов/Э. Д. Кравчик, Г. Я. Шкилько, А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф и др. Оpubл. в Б. И., 1974, № 40.
30. Церебеж Ю. И. Упрощенная схема соединений трехфазных волновых обмоток стержневого типа. — Вестник электропромышленности, 1951, № 12, с. 9—10.
31. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 2. — Л.: Энергия, 1956. — 704 с.
32. Кравчик Э. Д. Выбор сопряжения фаз двухскоростных электродвигателей с соотношением скоростей 2:1. — Вестник электропромышленности, 1952, № 2, с. 13—15.
33. Scheteling H., Weppler R. Polumschaltbare Drehstrom-Käfigläufermotoren mit PAM-Wicklung. — ETZ-A, 1971, Bd 92, H. 10, S. 576—579.
34. А. с. № 243033 (СССР). Трехфазная обмотка электрической машины переменного тока/А. И. Антоненко. Оpubл. в Б. И., 1973, № 47.
35. Захаров М. К., Дагтев В. Г., Родимов И. Н. Построение многоскорстных обмоток методом фазной модуляции при сдвиге модуляционной волны. — Электричество, 1976, № 9, с. 72—76.
36. А. с. № 240094 (СССР). Способ переключения обмотки машины переменного тока/А. М. Харитонов. Оpubл. в Б. И., 1969, № 12.
37. Arnold E., La Coure I. L. Die asynchronen Wechselstrommaschinen. Bd 1. Die Induktionsmaschinen. — Berlin: I. Springer, 1909. — 607 S.
38. Сорокер Т. Г. Расчет характеристик асинхронного двигателя. — Бюллетень ВЭИ, 1941, № 6, с. 27—32.
39. Рихтер Р. Электрические машины. Т. IV. Индукционные машины. — М.: ГОНТИ, 1939. — 472 с.
40. Nürenberg W. Die Asynchronmaschine. — Göttingen Springer-Verlag, 1952. — 407 S.
41. Сорокер Т. Г. Многофазный асинхронный двигатель. Многофазный асинхронный преобразователь частоты. Поверочный расчет. — Труды ВНИИЭМ, 1959, т. 3, с. 112.
42. Лившиц М. Электрические машины. Т. III. Расчет и определение размеров. — М.: ГОНТИ, 1933. — 410 с.
43. Воскресенский А. П. Магнитное поле в спинке ротора асинхронного двигателя. — Труды ВНИИЭМ. Асинхронные двигатели. Теоретические и экспериментальные исследования. Электромагнитные расчеты 1976, т. 45, с. 44—51.
44. Emde F. Einseitige Stromverdrängung in Ankernuten. — E. und M., 1908, Bd 24, S. 703—707.
45. Liwischitz-Garik M. Skin-effect bars of squirrel-cage rotors. — AIEE Transactions, 1954, vol. 73, III A, p. 255—258.
46. Liwischitz-Garik M. Calculation skin-effect of squirrel-cage rotors. — AIEE Transactions, 1955, vol. 74, III A, p. 768—771.
47. Пунга Ф. Проектирование электромашин. — Л.: Кубуч, 1934. — 325 с.
48. Кравчик Э. Д. Анализ экспериментальных данных о реактивном сопротивлении трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей небольшой и средней мощности с глубокопазным залитым алюминием ротором. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1972, вып. 2, с. 44—59.
49. Chalmers B. I., Dodgson R. Saturated leakage reactances of cage induction motors. — Proceeding of IEE, 1969, vol. 116, № 8, p. 1395—1404.
50. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 2. Машины переменного тока. — М. — Л.: Энергия, 1956. — 704 с.
51. Параметры электрических машин переменного тока с магнитными клиньями/Ф. К. Макаров, В. С. Бычков, В. Б. Пятачков, М. С. Недорезова. — Электротехника, 1974, № 12, с. 13—19.
52. Будников В. В., Воскресенский А. П., Комарова Л. А. Уточнение расчета магнитной цепи асинхронного двигателя. — Труды ВНИИЭМ. Асинхронные двигатели. Теоретические и экспериментальные исследования. Электромагнитные расчеты, 1976, т. 45, с. 52—61.
53. Вольдек А. И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974. — 839 с.

54. Гаинцев Ю. В. Расчет высших гармоник поля в воздушном вазоре асинхронной машины. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1970, вып. 1, с. 35—43.
55. Гаинцев Ю. В. Исследование формы поля в воздушном вазоре асинхронной машины методом конформных отображений. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1972, вып. 2, с. 38—43.
56. Гаинцев Ю. В. Полные добавочные потери в асинхронных двигателях серии АО2. — Электротехника, 1970, № 8, с. 12—13.
57. Гаинцев Ю. В. Влияние короткозамкнутого ротора на пульсационные потери. — Электротехника, 1975, № 8, с. 44—47.
58. Гаинцев Ю. В. Методы снижения добавочных потерь в низковольтных асинхронных двигателях. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1975, вып. 3, с. 19—22.
59. Гаинцев Ю. В. Методы уменьшения добавочных потерь и добавочных моментов в низковольтных короткозамкнутых асинхронных двигателях (обзор патентных материалов). — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1973, вып. 11(33), с. 24—27.
60. Гаинцев Ю. В. Влияние теплового состояния асинхронной машины на ее характеристики. — Электротехника, 1975, № 3, с. 20—21.
61. Keuth H. Magnetischer Protofer-Nutverschluss für elektrische Maschinen. — Siemens-Z., 1970, Bd 44, № 12, S. 736—740.
62. Oberreil K. 13 Regeln für minimale Zusatzverluste in Induktionsmotoren. — Bull. Oerlikon, 1969, № 389/390, S. 1—11.
63. Krecke W. New standard a. c. motors. — ASEA Journal, 1979, vol. 47, № 2, p. 27—33.
64. Гаинцев Ю. В. Влияние метода заливки ротора на характеристики асинхронных двигателей. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1972, вып. 2, с. 91—97.
65. A new concept in motor design for efficient production. — Electrical Review, April, 1975, p. 430—432.
66. Odok A. Stray-load losses and stray torques in induction machines. — Power App. and Syst., April, 1958, p. 43—53.
67. Филиппов И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. — Л.: Энергия, 1974. — 384 с.
68. Альтшуль А. Д., Киселев П. В. Гидравлика и аэродинамика. — М.: Госстройиздат, 1965. — 273 с.
69. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1975. — 559 с.
70. Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. — М.: Энергия, 1974. — 560 с.
71. Кухарский М. П., Самарский С. С. Влияние вращения потока на аэродинамическое сопротивление продуваемых электрических машин. — В кн.: Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. Харьков: ХАИ, 1978, вып. 7, с. 89—93.
72. Цой С., Рогов Е. И. Основы теории вентиляционных сетей. — Алма-Ата: Наука, 1965. — 283 с.
74. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. — М.: Госэнергоиздат, 1958. — 407 с.
74. Hak I. Der Lüfter des Drehstrommotors. — Konstruktion, 1961, H. 13, S. 148—154.
75. Burmester I. Probleme bei der geräuscharmen Belüftung von

kleinen oberflächengekühlten elektrischen Maschinen. — Siemens-Z., 1975, Bd 49, № 2, S. 103—108.

76. Невельсон М. И. Центробежные вентиляторы. — М.: Госэнергоиздат, 1954. — 390 с.

77. Бурковский А. Н., Ковалев Е. Б., Коробов В. К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения. — М.: Энергия, 1970. — 184 с.

78. Кухарский М. П., Носков В. А. Исследование и расчет вентиляторов наружного обдува. — Электротехника, 1975, № 3, с. 34—38.

79. Hak I. Zur Berechnung der Lüfter elektrischer Maschinen. — ETZ-A, 1959, H. 9, S. 264—268.

80. Hak I. Termika elektrických stroju tocivých část technického průvodce. — Elektrické stroje (II přepracovné vydání SNTL, Praha), 1969, s. 70—78.

81. Hak I., Oslejsek O. Výpočet chlazení elektrických strojů, díl I. — Brno: 1973. — 629 s.

82. Кухарский М. П., Носков В. А. Исследование реверсивных вентиляторов встраиваемых двигателей. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1974, вып. 3, с. 172—183.

83. ОСТ 16.0.800.397-77. Электродвигатели взрывозащищенные и рудничные. Вентиляторы наружного обдува. Геометрические размеры и характеристики.

84. Виноградов В. И. Исследование вентиляторов электрических машин. — М.: Энергия, 1970. — 92 с.

85. Жадан В. А., Санников Д. И. Исследование вентиляции закрытых асинхронных двигателей и их приближенный вентиляционный расчет. — Изв. Томского политехнического института, 1969, т. 219, с. 172—177.

86. Абрамович Г. М. Теория турбулентных струй. — М.: Физматгиз, 1960. — 715 с.

87. Кухарский М. П., Носков В. А., Родионова Р. П. Исследование наружного обдува низковольтных асинхронных двигателей. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1972, вып. 2, с. 116—125.

88. Кухарский М. П., Носков В. А. Экспериментальные исследования вентиляционного узла наружного обдува. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1972, вып. 6(16), с. 12—14.

89. Кухарский М. П., Новиков Г. Л., Тубис Я. Б. Метод пересчета геометрических параметров встроенных вентиляторов. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1972, вып. 2, с. 111—115.

90. Брагинский Б. И. Методика теплового расчета закрытых асинхронных электродвигателей средней мощности при повторно-кратковременном режиме работы. — Труды НИИ завода «Кузбасс-электромотор». Взрывозащищенное и рудничное электрооборудование, 1972, вып. 5, с. 46—51.

91. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.

92. Костенко М. П. Электрические машины. Спецчасть. — М.: Госэнергоиздат, 1949. — 324 с.

93. О термической стойкости электрических машин переменного тока с короткозамкнутыми системами в роторе/Р. А. Лютер и др. — Электросила, 1957, № 15, с. 17—21.

94. Михеев М. Л., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1973. — 320 с.
95. Некрасов О. А., Шевченко В. В., Рекус Г. Г. Расчет перегрева асинхронных машин по методу тепловых параметров. — Изв. вузов. Энергетика, 1964, № 1, с. 40—46.
96. Петров И. И., Мейстель А. М. Применение цепных экспоненциальных функций при расчете нагрева асинхронных короткозамкнутых двигателей. — Электричество, 1965, № 8, с. 7—13.
97. Постников И. М. Проектирование электрических машин. — Киев: Гостехиздат УССР, 1960. — 910 с.
98. Румянцев И. М. Расчет температурного поля электрической машины в нестационарном тепловом режиме. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1966, № 3, с. 47—51.
99. Суйский П. А. О выборе асинхронных двигателей для кратковременных и циклических режимов работы. — Электричество, 1964, № 10, с. 10—14.
100. Суйский П. А. Исследование нагрева асинхронных короткозамкнутых двигателей серий А и АО мощностью от 0,6 до 100 кВт при продолжительном режиме работы. — Электричество, 1958, № 9, с. 35—38.
101. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных двигателей. — Киев: Наукова думка, 1966. — 196 с.
102. Nak I. Wärmequellen Netze elektrischer Maschinen. — E. und M., 1959, Bd 76, S. 236.
103. Heiles F. Anlaufferwärmung von Käfigwicklungen und zulässige Schalthäufigkeit. — ETZ-A, 1962, H. 20, S. 48—52.
104. Яковлев А. И., Тубис Я. Б., Фанарь М. С. Тепловой расчет асинхронных электродвигателей с аксальной системой вентиляции. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1972, вып. 1(11), с. 17.
105. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 1969. — 559 с.
106. Бейзельман Р. Д., Цыпкин Б. В., Перель Л. Я. Подшипники качения. Справочник. — М.: Машиностроение, 1975. — 572 с.
107. Гузенков Р. Г. Детали машин. — М.: Высшая школа, 1975. — 424 с.
108. Мягков В. Д. Допуски и посадки. Справочник. — М. — Л.: Машиностроение, 1966. — 772 с.
109. Расчет и выбор подшипников качения. Справочник/Н. А. Спицын, Б. А. Яхин, В. Н. Перегудов, И. М. Забулунов. — М.: Машиностроение, 1974. — 56 с.
110. Шлыгин В. В. Прочностные и размерные расчеты электрических машин. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 320 с.
111. Подшипники качения. Справочное пособие/Под ред. Н. А. Спицына и А. И. Спришевского. — М.: Машиностроение, 1961. — 828 с.
112. Матялис А. П., Стрельбицкий Э. К. Модель надежности витковой изоляции обмоток в период приработки. — Изв. Томского политехнического института, 1972, т. 229, с. 46—52.
113. Матялис А. П., Стрельбицкий Э. К. Модель надежности корпусной изоляции. — Изв. Томского политехнического института, 1972, т. 229, с. 36—45.
114. Матялис А. П., Стрельбицкий Э. К. Методика исследования старения изоляции низковольтных электрических машин. — Изв. Томского политехнического института, 1972, т. 242, с. 113—116.
115. ОСТ 16.0682.007-73. Двигатели асинхронные трехфазные короткозамкнутые общего применения мощностью от 0,12 до 100 кВт. Расчет надежности и долговечности всыпных обмоток.
116. Почолков Ю. П. Исследование коммутационных перенапряжений в обмотках асинхронных двигателей. — Изв. Томского политехнического института, 1972, т. 242, с. 213—215.
117. Куйбышев А. В. Надежность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 104 с.
118. Ковалев Ю. М. Расчет вентиляционных шумов в электрических машинах и способы их уменьшения (обзор). — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1973, № 5(27), с. 27—28.
119. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. — Л.: Энергия, 1974. — 200 с.
120. Zardin H. Ventilations- und geräuschproblem in Asynchronmotoren. — Bull. Oerlikon, 1967, S. 373—374.
121. Müller R. The problem of noise in rotating electrical machines. — ACEC Review, 1964, № 1, p. 10—25.
122. Der Einfluss dünnwandiger Gehäuse auf den magnetischen Lärm von Drehstrommaschinen/H. Iordan, M. Purkermani, W. Raube, P. Röder. — Lärmbekämpfung, 1970, № 4, S. 81—88.
123. Ковалев Ю. М. Влияние кожуха вентилятора на шум обдуваемых двигателей. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1973, № 4(26), с. 9—10.
124. Городецкий Э. А. Расчет вентиляционного шума электрических машин. — Вестник электропромышленности, 1963, № 6, с. 15—19.
125. Городецкий Э. А. Вопросы расчета вентиляционного шума электрических машин. — В кн.: Конструирование и изготовление машин с улучшенными виброакустическими характеристиками. М.: Информстандартэлектро, 1968, вып. 3, с. 3—26.
126. Юдин Е. Я. Исследование шума вентиляторных установок и методов борьбы с ним. — В кн.: Труды ЦАГИ. — М.: Оборонгиз, 1958, вып. 713. — 220 с.
127. Forkman H. Konstruktive und technologische Voraussetzungen für die Fertigung von schwingungs- und geräuscharmen Drehstrommotoren Leistungsbereich bis 10 kw. — Elektrische, 1963, Bd 17, № 11, S. 358—361.
128. Bicher N. Studiul zgomotului masinilor electrice. — Electrotechnica, 1963, an. 11, № 2, p. 50—57.
129. Коварский Е. М., Муркес Н. И., Вретик З. П. Общие закономерности проектирования малошумных электрических машин. — В кн.: Конструирование и изготовление электрических машин с улучшенными виброакустическими характеристиками. — М.: Информстандартэлектро, 1968, вып. 1, с. 3—67.
130. Методы снижения шума и вибрации электрических машин при их разработке и модернизации/Н. И. Муркес, Э. Р. Кучер, Э. А. Городецкий, А. И. Каплин. — В кн.: Конструирование и изготовление электрических машин с улучшенными виброакустическими характеристиками. — М.: ВНИИЭМ, 1968, вып. 1, с. 68—115.
131. Экспериментальное исследование резонанса стальных штампованных кожухов/Ю. М. Ковалев, Г. В. Рябова, В. И. Голубев, М. П. Кухарский. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1975, вып. 9(55), с. 6—7.

132. Лазарову Д. Ф., Бикир Н. Шум электрических машин и трансформаторов. — М.: Энергия, 1973. — 273 с.
133. Балансировка и вибрация электрических машин. — М.: ЦИНТИ, 1961. — 100 с.
134. Влияние типа подшипников и чистоты посадочной поверхности под подшипник на вибрацию асинхронных двигателей/Ю. М. Ковалев, Г. В. Рябова, М. В. Лисицкий, В. И. Голубев. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1974, вып. 3, с. 100—108.
135. Коварский Е. М. О расчете вибрации электрических машин. — Электротехника, 1974, № 12, с. 27—31.
136. Weh H. Zur elektromagnetischen Schwingungsanregung bei Asynchronmaschinen. — ETZ-A, 1964, Bd 85, H. 7, S. 193—197.
137. Oberretl K. Über Sättigungsoberfelder in Induktionsmaschinen. — Elektrotechnik und Maschinenbau, 1961, Bd 78, H. 8, S. 285—294.
138. Расчет уровней магнитных вибраций трехфазных асинхронных двигателей на ЭВМ/Ю. А. Шумилов, А. С. Панюшкин, Г. Н. Блаудзевич, В. Ф. Росланкин. — Вестник Киевского политехнического института, 1972, № 9, с. 162—165.
139. Вольдек А. И. Влияние неравномерности воздушного зазора на магнитное поле асинхронной машины. — Электричество, 1951, № 12, с. 40—46.
140. Вольдек А. И. Магнитное поле в воздушном зазоре электрической машины. — Труды ЛПИ, 1953, № 3, с. 60—80.
141. Jordan H. Geräuscharme Elektromotoren. — Essen: Girardet, 1950. — 97 S.
142. Морозов П. А. Техника и экономика промышленного производства. — М.: Знание. Сер. Промышленность, 1974. — 63 с.
143. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Экспертные оценки. — М.: Наука, 1973. — 160 с.
144. Основные положения по планированию, учету и калькулированию себестоимости на промышленных предприятиях. — М.: Прейскурантиздат, 1970. — 128 с.
145. Воскресенский Б. В., Паламарчук А. С. Справочник экономиста машиностроительного предприятия. — М.: Машиностроение, 1971. — 376 с.
146. Планирование промышленных предприятий. — М.: Мысль, 1966. — 263 с.
147. Хавин З. Накладные расходы в производстве электродвигателей мощностью до 100 кВт. — Труды ВНИИЭМ, 1966, вып. 22, с. 89—99.
148. Васильев Г. С. Укрупненные нормативы материальных и трудовых затрат для расчета экономической эффективности новых типов электродвигателей. — В кн.: Вопросы экономики электроэнергетических машин и систем. — Л.: Наука, 1971, с. 105—110.
149. Сустан Г. К., Васильев В. А. Расчет трудоемкости изготовления модификаций и специализированных исполнений двигателей единой серии. — Технология электротехнического производства, 1971, вып. 33, с. 3—5.
150. Гольдберг О. Д., Курбатова Г. С. Влияние условий эксплуатации на надежность асинхронных двигателей. — Стандарты и качество, 1974, № 4, с. 55—58.
151. Единая система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий. — М.: Машиностроение, 1967. — 591 с.

152. Каневский Л. М. О системе основных экономических показателей технического прогресса. — Электротехника, 1971, № 3, с. 49—52.
153. Тищенко Н. А. Проблема надежности электродвигателей. — Электричество, 1961, № 11, с. 7—13; № 12, с. 16—19.
154. Фураева В. В., Петренко В. Г. Некоторые экономические вопросы при проектировании единых серий асинхронных двигателей. — Труды МЭИ, вып. 98, с. 109—119.
155. Низковольтные асинхронные двигатели единой серии 4А/А. П. Воскресенский, К. И. Серебряков, Т. Г. Сорокер, И. Н. Чархъян. — Электротехника, 1972, № 6, с. 36—39.
156. Кузнецов Б. И., Радин В. И. Асинхронные двигатели единой серии с высотой оси вращения 280—355 мм. — Электротехника, 1972, № 6, с. 40—43.
157. Иосифьян А. Г. Развитие новых перспективных единых серий электрических машин. — Электротехника, 1972, № 7, с. 1—3.
158. Васильев Г. С., Шилова Ф. Д., Яковенко Л. Е. Особенности расчетов оптовых цен на электрические машины переменного тока, входящие в единые серии. — В кн.: Вопросы экономики электрических машин и систем. — Л.: Наука, 1971, с. 110—116.
159. Кузнецов Б. И., Сорокер Т. Г. Асинхронные электродвигатели мощностью до 400 кВт. М.: Информэлектро, 1972. — 52 с.
160. Зельцбург Л. М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Высшая школа, 1973. — 272 с.
161. Моисеев М. П. Экономика технологичности конструкций. — М.: Машиностроение, 1973. — 350 с.
162. Львов Д. С. Экономика качества продукции. — М.: Экономика, 1972. — 255 с.
163. Барташев Л. В. Техничко-экономические расчеты при проектировании и производстве машин. — М.: Машиностроение, 1973. — 384 с.
164. Александров В. И. Принципы и практика определения лимитных цен на новое оборудование. — Л.: ЛДНТП, 1973. — 40 с.
165. Низковольтные электродвигатели переменного тока на международной выставке «Электро-72»/А. Э. Кравчик, Б. Я. Гусев, В. В. Лаптев, Е. П. Бойко. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1973, вып. 5, с. 29—32.
166. Применение холоднокатаной слаболегированной электротехнической стали в асинхронных двигателях мощностью до 100 кВт/А. Э. Кравчик, Е. П. Бойко, В. Т. Тильк и др. — Электротехническая промышленность. Электрические машины, 1974, вып. 8, с. 14—17.
167. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. Л.: Энергия, 1974. — 383 с.
168. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. — М.: Энергия, 1974. — 238 с.
169. Кравчик А. Э., Бойко Е. П. Учет магнитной анизотропии электротехнической стали при расчете трехфазных асинхронных двигателей. — Электротехника, 1976, № 5, с. 36—37.
170. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общепромышленного применения. — М.: Энергия, 1971. — 367 с.
171. Булгаков Б. В., Лапшов Б. В., Филимонова А. В. Обмоточные и выводные провода для электродвигателей серии 4А. — Электротехническая промышленность. Кабельная техника, 1975, вып. 4, с. 6—9.

172. Привезенцев В. А., Пешков И. Б. Обмоточные и монтажные провода. — М.: Энергия, 1971. — 254 с.
173. Веселов В. В., Лопатин А. Ф. Изоляция из полиэтиленовых фталатных пленок в низковольтных электрических машинах. — Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы, 1975, вып. 12, с. 19—25.
174. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1 и 2/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — М.: Энергия, 1974. — том 1 — 359 с., том 2 — 130 с.
175. Веселов В. В. Особенности электроизоляционных конструкций асинхронных двигателей мощностью до 250 кВт зарубежных фирм. — Электротехнические материалы, 1973, вып. 8, с. 23—26.
176. Merschicht — Material der Isolierstoffklasse F. — EMA, 1970 № 4, S. 124.
177. Labitzke G. Isolation von Statoren. — EMA, 1973, № 7, S. 207—210.
178. Neal I. E. Insulating materials for industrial machines. — Electrical Times, 1972, 21 September, p. 53—54.
179. Технологические преимущества пропиточных полиэфирных и полиэфирно-эпоксидных лаков без растворителей/Б. В. Ниценко, Л. А. Лукьяненко, Ю. В. Михайлусь, Г. М. Иванов. — Труды ВНИИТэлектромаш, 1971, вып. 9, с. 3—12.
180. Штальборн Т. Лаки без растворителя для заливки и пропитки изделий электротехнической и электронной промышленности. — Электротехника, 1974, № 6, с. 58—60.
181. Электроизоляционные материалы в США. — М.: Информ-стандартэлектро, 1967. — 80 с.
182. Патентный обзор по магнитным клиньям/В. Б. Пятачков, Ф. К. Макаров, Л. П. Колокольцева, А. В. Петрова. Депонирован в 1975. — М.: ВНИИЭМ, № 762Д. — 31 с.
183. Зинченко О. А., Петров В. М., Радин В. И. Некоторые итоги работ по созданию и внедрению в производство электродвигателей серии 4А. — Электротехническая промышленность. Общепромышленные вопросы, 1977, вып. 1, с. 20—22.
184. А. с. № 53436 (СССР). Клин для пазов электрических машин/С. В. Штейнберг. Оpubл. в Б. И., 1938, № 8.
185. А. с. № 106411 (СССР). Способ выполнения ферромагнитных клиньев/С. В. Перов. Оpubл. в Б. И., 1957, № 5.
186. А. с. № 169706 (СССР). Ферромагнитная диэлектрическая масса/Ю. Т. Борзяк, Н. Н. Остер-Волков, А. И. Ролик, А. И. Яковлев. — Оpubл. в Б. И. 1965, № 7.
187. Sperling P., Volfgang V. Zugkräfte auf magnetische Nutverschlussskeile. — ETZ-A, 1971, H. 8, S. 3.
188. Пат. № 1172767 (ФРГ). Magnetischer Nutverschluss für elektrische Maschinen/Н. Keuth, E. Massar.
189. Кравчик А. Э., Шлаф М. М. Вопросы проектирования двигателей новой единой серии в закрытом исполнении. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1974, вып. 3, с. 63—84.
190. Ковалев Ю. М., Рябова Г. В. Оценка шума серии электродвигателей. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1974, вып. 3, с. 109—117.
191. А. с. № 228765 (СССР). Закрытый обдуваемый асинхронный двигатель/И. А. Воробьева, А. И. Вустина, З. А. Капалина и др. Оpubл. в Б. И., 1968, № 32.

192. Александров М. П. Тормозные устройства в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1965. — 676 с.
193. Молчанов Ю. М. Электродвигатели со встроенным электромагнитным тормозом. — М.: Информэлектро, 1969. — 63 с.
194. Новое в технологии производства асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт/Под ред. канд. техн. наук. А. С. Джанояна. — М.: Информэлектро, 1972. — 96 с.
195. Евсюков Л. Н. Исследование точности сборки роторов асинхронных электродвигателей. — Труды ВНИИТэлектромаш, 1970, вып. 3, с. 52—60.
196. Технология, материалы и оборудование для литейного производства. — М.: Интерлитмаш-73, 1974. — 112 с.
197. Бронин С. В., Ахтырский В. И., Сидоренко И. Я. Разработка технологии термической обработки листов магнитопроводов электродвигателей серии 4А. — Труды ВНИИТэлектромаш, 1975, вып. 12, с. 46—58.
198. Мощицкий В. Б. Технология обработки станин электродвигателей на автоматическом оборудовании. — Труды НИПТИЭМ. Асинхронные двигатели, 1970, вып. 2, с. 173—193.
199. Мощицкий В. Б., Гагашкин Г. И. Новая технология обработки щитов электродвигателей. — Технология электротехнического производства, 1974, вып. 9, с. 6—8.
200. Анализ производительности средств автоматизированной статорообмотки/В. С. Елифанов, В. Н. Олефиренко, А. И. Никонов, И. Я. Фельдштейн. — Труды ВНИИТэлектромаш, 1974, вып. 11, с. 88—102.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
Глава первая. Характеристика и объем вопросов, решаемых при проектировании единых серий асинхронных двигателей. Порядок проектирования	13
1-1. Требования, предъявляемые к серии асинхронных двигателей	13
а) Структура серии	14
б) Ряды номинальных мощностей и установочных размеров	16
в) Частоты вращения	16
г) Напряжение и частота сети	17
д) Степени защиты	17
е) Формы исполнения	18
ж) Энергетические показатели	18
з) Пусковые характеристики	19
и) Виброшумовые характеристики	23
к) Требования к конструкции	24
л) Надежность и долговечность	26
м) Экономичность	26
1-2. Стадии разработки	27
а) Техническое задание	27
б) Эскизный проект	27
в) Технический проект	28
г) Рабочий проект	29
д) Установочные серии	29
1-3. Методы проектирования	30
1-4. Расчеты, проводимые при проектировании. Взаимосвязь и последовательность расчетов	32
Глава вторая. Определение и выбор исходных данных для оптимального проектирования	33
2-1. Шкала мощностей, шкала установочных размеров и их взаимная увязка	33
а) Шкала мощностей	33
б) Шкала установочных размеров	38
в) Увязка шкалы мощностей и шкалы установочных размеров	40
2-2. Выбор основных электротехнических материалов	45
а) Электротехническая сталь	45
б) Элементы системы изоляции	50

в) Обмоточные провода	57
2-3. Внешний диаметр сердечника статора	60
2-4. Воздушный зазор между статором и ротором	68
2-5. Число пазов статора и ротора	70
2-6. Форма пазов статора и ротора	76
2-7. Выбор конструктивного исполнения	80
а) Конструктивная схема	80
б) Материал оболочки	82

Глава третья. Оптимальное проектирование

3-1. Постановка задачи. Выбор критерия оптимальности	83
а) Постановка задачи нелинейного программирования	83
б) Выбор критерия оптимальности	85
3-2. Определение состава независимых варьируемых переменных и ограничений	90
а) Состав независимых варьируемых переменных	90
б) Состав ограничений (лимитеров)	95
3-3. Вычислительные методы	96
а) Геометрическая интерпретация задачи программирования	96
б) Методы поиска и их эффективность	97
в) Метод полного перебора	98
г) Метод Монте-Карло	98
д) Метод Гаусса — Зейделя	98
е) Градиентные методы	99
ж) Методы поиска при наличии ограничений	101
з) Локальные методы случайного поиска	102
3-4. Анализ закономерностей изменения технико-экономических показателей оптимального двигателя	103

Глава четвертая. Обмотки асинхронных двигателей

4-1. Общие сведения	109
4-2. Схемы обмоток	111
а) Развернутая схема	112
б) Схема соединения катушечных групп	112
в) Торцевая схема	112
4-3. Способы анализа свойств обмоток	113
а) Построение звезды пазовых э. д. с.	113
б) Построение кривой м. д. с.	116
4-4. Свойства симметричных обмоток	116
4-5. Статорные обмотки	118
а) Одно-двухслойная концентрическая обмотка	121
б) Двухслойная концентрическая обмотка для механизированной укладки	125
в) Обмотки с $0,5 \leq q \leq 1$	127
г) Размерные расчеты катушек выпных обмоток	127
4-6. Обмотки фазных роторов	128
а) Выпные обмотки	129
б) Стержневые обмотки	130
4-7. Обмотки многократных двигателей с переключением числа полюсов	132

а) Обмотки с переключением числа полюсов в отношении 1:2	132
б) Обмотки с переключением числа полюсов в отношении, не равном 1:2	134
Глава пятая. Электромагнитный расчет	138
5-1. Аналитический метод расчета характеристик асинхронных двигателей	138
а) Схема замещения и ее параметры	138
б) Зависимость электромагнитной и механической мощностей от скольжения	140
в) Ток статора. Коэффициент мощности. Ток ротора	142
г) Кратности максимального и начального пускового моментов. Начальный пусковой ток	143
5-2. Расчет намагничивающего тока и главного индуктивного сопротивления обмотки статора	144
а) Приложение закона полного тока к расчету магнитной цепи	144
б) Магнитный поток	145
в) Магнитное напряжение воздушного зазора	146
г) Магнитное напряжение зубцов	147
д) Магнитное напряжение спинок	149
е) Главное индуктивное сопротивление обмотки статора	151
5-3. Расчет активных сопротивлений	152
5-4. Расчет индуктивных сопротивлений рассеяния	153
а) Пазовое рассеяние	154
б) Рассеяние лобовых частей	157
в) Дифференциальное рассеяние	158
г) Рассеяние скоса пазов	159
5-5. Потери и к. п. д.	159
5-6. Расчет активного и индуктивного сопротивлений рассеяния обмотки ротора с учетом вытеснения тока в стержнях	161
5-7. Расчет индуктивного сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора с учетом насыщения от полей рассеяния	164
а) Метод эквивалентного открытия паза	164
б) Другие методы учета насыщения	166
5-8. Особенности расчета двигателей с двойной клеткой ротора	167
а) Схема замещения ротора и ее параметры	167
б) Расчет параметров схемы замещения для рабочего режима	169
в) Расчет параметров схемы замещения с учетом вытеснения тока в стержнях ротора	170
5-9. Особенности расчета двигателей с магнитными клиньями	172
Глава шестая. Расчет пуска короткозамкнутых асинхронных двигателей	176
6-1. Основное уравнение динамики электропривода	176
6-2. Вращающий момент и механические характеристики современных двигателей	177

6-3. Динамический и статический моменты сопротивления	182
6-4. Основные зависимости при пуске	183
а) Длительность пуска	183
б) Потери энергии в обмотке ротора при пуске	185
в) Потери энергии в обмотке статора при пуске	188
г) Энергия, потребляемая двигателем за период пуска	189
Глава седьмая. Расчет добавочных потерь и добавочных моментов	190
7-1. Высшие гармоники поля в воздушном зазоре	190
7-2. Высшие гармоники поля в зубцах ротора и статора	196
7-3. Влияние высших гармоник поля на характеристики двигателя	197
7-4. Расчет добавочных потерь	199
7-5. Расчет добавочных моментов	204
7-6. Способы уменьшения высших гармоник поля	206
7-7. Конструктивные методы снижения добавочных потерь и моментов	209
7-8. Технологические методы снижения добавочных потерь и моментов	212
Глава восьмая. Вентиляционный расчет	214
8-1. Основные понятия и задачи вентиляционного расчета	214
8-2. Аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети	216
а) Режимы течения	216
б) Потери напора и аэродинамические сопротивления	217
в) Аэродинамические сопротивления, обусловленные вращением каналов или потоков воздуха	221
г) Расчет сложных вентиляционных сетей	223
8-3. Аэродинамические характеристики центробежных вентиляторов	226
8-4. Методы расчета встроенных вентиляторов	231
8-5. Рекомендации по проектированию встроенных центробежных вентиляторов наружного обдува	238
а) Общие требования к конструкции рабочего колеса	239
б) Распределение и использование воздуха в межреберных каналах станины	243
в) Рекомендации по конструкции вентиляторов наружного обдува	246
г) Вентиляционный расчет двигателей со степенью защиты IP44	248
д) Вопросы моделирования и подбора вентиляторов	251
Глава девятая. Тепловой расчет	253
9-1. Общие сведения	253
9-2. Методы теплового расчета при установившихся тепловых режимах	253
а) Метод температурных полей	254
б) Метод эквивалентных тепловых схем	255
в) Метод эквивалентных греющих потерь	257

9-3. Тепловой расчет при установившемся режиме по методу ЭТС	257
а) Карта теплопередачи и основные допущения	257
б) Тепловая схема замещения, основные уравнения и их решение	260
в) Расчет тепловых проводимостей	262
г) Коэффициенты теплоотдачи	268
д) Коэффициенты теплопроводности	271
9-4. Тепловые расчеты при нестационарных режимах	272
а) Математическое описание процессов нагрева двигателя	272
б) Расчет нагрева обмоток при пуске	273
в) Расчет нагрева двигателя при кратковременных режимах	276
г) Расчет нагрева двигателя при повторно-кратковременных режимах	281
Глава десятая. Расчеты размерных цепей и механические расчеты	283
10-1. Расчеты размерных цепей	283
а) Назначение и основные методы	283
б) Размерные цепи асинхронного двигателя	284
10-2. Механические расчеты	292
а) Расчет вала	296
б) Расчет клиноременной передачи	302
в) Расчет зубчатой передачи	306
г) Выбор усилия и расчет пружин осевого нажатия	309
д) Выбор подшипников. Расчет долговечности	311
е) Расчет динамического момента инерции ротора	316
Глава одиннадцатая. Расчет надежности	318
11-1. Основные понятия и термины	318
11-2. Основные причины отказов асинхронных двигателей	319
11-3. Расчет надежности обмотки	321
а) Расчетная схема отказа изоляции	322
б) Вероятность безотказной работы витковой изоляции	323
в) Вероятность безотказной работы корпусной изоляции	328
11-4. Некоторые пути повышения надежности электродвигателей	330
Глава двенадцатая. Расчет виброшумовых характеристик	332
12-1. Стандартные виброшумовые характеристики	332
12-2. Основные источники шумов и вибраций асинхронных двигателей	334
12-3. Вентиляционный шум	335
а) Источники и частоты вентиляционного шума	335
б) Приближенные методы расчета вентиляционного шума	338
в) Рекомендации по снижению уровня вентиляционного шума	342

12-4. Шум и вибрация механического происхождения	346
а) Нормы неуравновешенности вращающихся частей. Расчеты вибрации, обусловленной неуравновешенностью	346
б) Расчет вибрации, создаваемой подшипниками	351
в) Рекомендации по снижению уровня шума и вибраций механического происхождения	355
12-5 Шум и вибрация магнитного происхождения	357
а) Причины магнитного шума и вибрации	357
б) Расчет магнитного шума и вибрации	360
в) Рекомендации по снижению уровня шума и вибраций магнитного происхождения	372
Глава тринадцатая. Экономические расчеты при проектировании асинхронных двигателей	374
13-1. Основные положения	374
13-2. Расчет стоимости двигателя и затрат на его монтаж	379
а) Затраты на материалы. Расчет по структуре затрат	379
б) Трудовые затраты	382
в) Внепроизводственные расходы	386
г) Полная себестоимость и предварительная цена двигателя; затраты на монтаж	387
13-3. Расчет затрат на активные потери электроэнергии	387
13-4. Затраты на обслуживание	388
а) Затраты на амортизацию	388
б) Затраты на ремонты	388
13-5. Затраты на разработку и внедрение	390
13-6. Затраты на компенсирующие устройства и необходимые производственные площади	391
13-7. Ориентировочные экономические расчеты при выборе оптимального варианта	392
Глава четырнадцатая. Электротехнические и конструкционные материалы	393
14-1. Электротехнические материалы	393
а) Электротехническая сталь	393
б) Электроизоляционные материалы и провода	397
в) Материалы для магнитных клиньев	412
14-2. Конструкционные материалы	413
а) Чугун	414
б) Стальной прокат	414
в) Алюминий и его сплавы	414
г) Пластмассы	417
д) Вспомогательные материалы	419
14-3. Материалы для контактных колец, щетки и припои	419
14-4. Материалы покрытий, консервации, уплотнений	423
Глава пятнадцатая. Асинхронные двигатели серии 4А	425
15-1. Шкала мощностей, шкала установочных размеров и их взаимная увязка; номинальные напряжения; структура серии	425
15-2. Конструкция двигателей серии 4А	428

а) Основные конструктивные решения	428
б) Конструкция оболочек	431
в) Конструкция активных частей	434
г) Конструкция подшипниковых узлов и валов	438
д) Конструкция вводных устройств	441
15-3. Характеристики двигателей серии 4А	442
а) Энергетические показатели	442
б) Пусковые характеристики	443
в) Виброшумовые характеристики	443
15-4. Модификации двигателей серии 4А	445
а) Двигатели с повышенным пусковым моментом	445
б) Двигатели с повышенным скольжением	446
в) Многоскоростные двигатели	447
г) Двигатели со встроенным электромагнитным тормозом	450
д) Двигатели с фазным ротором	451
е) Малошумные двигатели	455
15-5. Встраиваемые двигатели	455
15-6. Технология производства двигателей серии 4А мощностью до 100 кВт	456
а) Литейное производство	456
б) Штамповка и термообработка листов магнитопровода. Сборка сердечников	459
в) Механическая обработка	461
г) Обмоточно-изолирующие и пропиточные работы	466
д) Сборка, испытания и окраска электродвигателей	469
Список литературы	471

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ БОЙКО, ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ГАИНЦЕВ,
ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ КОВАЛЕВ, АРТЕМ ЭММАНУИЛОВИЧ
КРАВЧИК, ЭММАНУИЛ ДАВИДОВИЧ КРАВЧИК, МАИ ПЕТРОВИЧ
КУХАРСКИЙ, ФЕЛИКС КОНСТАНТИНОВИЧ МАКАРОВ, ВИКТОР
БОРИСОВИЧ МОЩИЦКИЙ, ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ ПЕТРОВ,
ЭДУАРД КАРЛОВИЧ СРЕЛЬБИЦКИЙ, НИКОЛАИ ИВАНОВИЧ
СУВОРОВ, ЯКОВ БОРИСОВИЧ ТУБИС, МИХАИЛ МАРКОВИЧ
ШЛАФ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Редактор Э. П. Клименко
Редактор издательства Л. А. Решмина
Переплет художника В. П. Осипова
Технический редактор Л. В. Иванова
Корректор Г. А. Полонская

ИБ № 1184

Сдано в набор 21.12.79. Подписано в печать 14.04.80. Т-07169. Формат
84×108/32. Бумага типографская № 2. Гарн. шрифта литературная.
Печать высокая. Усл. печ. л. 25,62. Уч.-изд. л. 27,64. Тираж 16 000 экз.
Заказ № 222. Цена 1 р. 60 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7